

Dyscyplina naukowa Rolnictwo i Ogrodnictwo

mgr inż. Łukasz Rusek

Rozprawa doktorska

**Badania nad technologią wytwarzania nawozów otoczkowanych
o spowolnionym działaniu oraz ich wpływ na plonowanie
i parametry jakościowe roślin**

**Research on the technology of producing slow-release coated fertilizers
and their impact on crop yields and quality parameters**

Rozprawa doktorska
wykonana w Katedrze Chemii Rolnej
i Środowiskowej

Promotor: dr hab. Marzena S. Brodowska, prof. uczelni

Lublin, 2025

„Nie idź tam, gdzie prowadzi ścieżka.

Idź tam, gdzie nie ma ścieżki i zostaw ślad.” – Ralph Waldo Emerson

*Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania
Pani dr hab. Marzenie Brodowskiej, prof. uczelni, za opiekę naukową,
cenne wskazówki, wsparcie merytoryczne
oraz życzliwość okazaną podczas realizacji niniejszej pracy doktorskiej.*

*Szczególne podziękowania kieruję również
do Pana dr inż. Sebastiana Schaba
za pomoc, zaangażowanie i konstruktywne uwagi,
które w istotny sposób przyczyniły się
do powstania i udoskonalenia tej rozprawy.*

*Pracę tę dedykuję mojej żonie Justynie oraz dzieciom, Marii i Mikołajowi, za wsparcie
i miłość, które dodawały mi sił przez cały czas pracy.*

Załącznik Nr 2

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data 28.10.2025 r. Podpis promotora Marek G. Brodowski

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotora/ Promotorów/ Promotora pomocniczego* i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

- przedstawiona rozprawa doktorska nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.

niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest tożsama z załączoną na płycie CD wersją elektroniczną.

Data 28.10.2025 r. Podpis autora [Podpis]

*niepotrzebne skreślić

Spis treści

1. Streszczenie	5
2. Abstrakt.....	7
3. Wprowadzenie	9
4. Hipoteza i cel badań.....	26
5. Materiał i metody.....	27
6. Wyniki badań.....	34
6.1. Wyniki przedstawione w publikacji P1	34
6.2. Wyniki przedstawione w publikacji P2	35
6.3. Wyniki przedstawione w publikacji P3	37
7. Wyniki niepublikowanych badań i dyskusja	41
7.1. Zawartość makroelementów w kukurydzy	41
7.1.1. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy	41
7.1.2. Zawartość fosforu w kukurydzy	44
7.1.3. Zawartość potasu w kukurydzy	46
7.1.4. Zawartość magnezu w kukurydzy	50
7.1.5. Zawartość siarki w kukurydzy	52
7.2. Zawartość mikroelementów w kukurydzy.....	55
7.2.1. Zawartość cynku w kukurydzy	55
7.2.2. Zawartość manganu w kukurydzy	57
7.2.3. Zawartość miedzi w kukurydzy	60
7.2.4. Zawartość żelaza w kukurydzy	63
7.3. Właściwości gleby	66
7.3.1. pH gleby.....	66
7.3.2. Zawartość azotu ogólnego w glebie.....	67
7.3.3. Zawartość azotu azotanowego (N-NO ₃) w warstwie gleby 0–30 cm	73
7.3.4. Zawartość azotu azotanowego (N-NO ₃) w warstwie gleby 30–60 cm	76
7.3.5. Zawartość azotu amonowego (N-NH ₄) w warstwie gleby 0–30 cm.....	77
7.3.6. Zawartość azotu amonowego (N-NH ₄) w warstwie gleby 30–60 cm.....	79
7.3.7. Zawartość fosforu przyswajalnego w glebie.....	81
7.3.8. Zawartość potasu przyswajalnego w glebie.....	83
7.3.9. Zawartość magnezu przyswajalnego w glebie.....	86
8. Dyskusja niepublikowanych badań	90
9. Podsumowanie i wnioski	96
10. Bibliografia	102

Wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji

	Bibliografia	Punkty MEiN	IF
P1	Rusek Ł., Brodowska M.S., Schab S., Rusek P. „Technologia produkcji mineralnych nawozów o kontrolowanym uwalnianiu (CRF) z wykorzystaniem materiałów biodegradowalnych w procesie powlekania” <i>Przemysł Chemiczny</i> 2024, 103, 282–285. DOI: 10.15199/62.2024.2.10	70	0,4
P2	Rusek Ł., Rusek P., Zdeb Z., Schab S., Borowik K., Brodowska M. S. „Technologia wytwarzania nawozów granulowanych wzbogaconych mikrobiologicznie metodą otoczkowania wraz z określeniem parametrów procesowych” <i>Przemysł Chemiczny</i> 2025, 104, 91–104. DOI: 10.15199/62.2025.1.5	70	0,4
P3	Rusek Ł., Brodowska M.S., Bogusz P., Rusek P. „Assessment of the Impact of Biodegradable Coated Fertilizers on Corn Yield.” <i>Agriculture</i> 2025, 15, 2191. DOI: 10.3390/agriculture15212191	100	3,6
Razem		240	4,4

1. Streszczenie

Przedmiotem pracy jest ocena wpływu nawozów otoczkowanych na plonowanie i jakość kukurydzy przeznaczonej na kiszonkę. Nawozy otoczkowane stanowią innowacyjne rozwiązanie w rolnictwie precyzyjnym, umożliwiając kontrolowane uwalnianie składników pokarmowych, zwłaszcza azotu, dostosowane do potrzeb roślin w różnych fazach wzrostu. Ich stosowanie pozwala na zwiększenie efektywności nawożenia oraz zmniejszenie strat składników, co przekłada się na korzyści ekonomiczne i środowiskowe. Praca zawiera przegląd literatury dotyczący mechanizmów uwalniania składników z nawozów otoczkowanych, rodzajów wykorzystywanych powłok, ze szczególnym uwzględnieniem powłok biodegradowalnych, oraz aspektów technologicznych ich produkcji. Przedstawiono różnorodne materiały powłokowe, takie jak polimery syntetyczne, biopolimery, polisacharydy, lignina i białka, wraz z ich właściwościami oraz potencjałem zastosowania w kontroli tempa uwalniania nawozów. W części eksperymentalnej opisano wyniki badań polowych prowadzonych w warunkach klimatyczno-glebowych regionu lubelskiego na kukurydzy odmiany Pioneer P8240, w trzech kolejnych sezonach wegetacyjnych. Badania objęły różne typy nawozów mineralnych (mocznik, nawozy wieloskładnikowe) oraz ich wersje z powłokami biodegradowalnymi opartymi na olejach roślinnych i pyle węgla brunatnego, stosowane w dwóch dawkach azotu (135 i $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$). Analizowano wpływ tych czynników na zawartość makro- i mikroelementów w roślinach i glebie, a także na plonowanie i parametry jakości kukurydzy. Wyniki wskazują na relatywnie stabilne wartości zawartości azotu amonowego (N-NH_4) w glebie warstw $0\text{--}30 \text{ cm}$ i $30\text{--}60 \text{ cm}$, niezależnie od rodzajów nawozów, rodzaju powłok i dawki azotu. Brak istotnych różnic statystycznych potwierdzały wyniki analizy wariancji i testu Tukeya, choć wykazano słabe interakcje między czynnikami, które mogą sugerować lokalne kumulacje azotu amonowego przy zastosowaniu nawozów z powłoką typu 2 i niższą dawką azotu. Podobnie zróżnicowanie przestrzenne i wysoka zmienność azotu organicznego wskazują na dominację lokalnych czynników mikrobiologicznych i fizycznych nad nawożeniem w kształtowaniu zasobów azotu w glebie. Optymalne dawkowanie i podział dawek azotu, wraz z odpowiednio dobranym rodzajem nawozu i formą aplikacji, pozwalają na zwiększenie efektywności produkcji przy jednoczesnym ograniczeniu strat składników i negatywnego wpływu na środowisko. Technologie produkcji nawozów otoczkowanych, takie jak natrysk roztworów polimerowych w złożu fluidalnym, ekstruzja reaktywna czy

mikrokapsułkowanie, umożliwiając precyzyjne kształtowanie profilu uwalniania składników, a rosnące znaczenie mają powłoki biodegradowalne, które spełniają wymogi zrównoważonego rolnictwa i regulacje prawne dotyczące eliminacji mikroplastików. Rozwój tych technologii w kierunku powłok wielowarstwowych oraz ich integracja z systemami precyzyjnej aplikacji nawozów stwarza perspektywy dla dalszego zwiększania efektywności nawożenia i ochrony środowiska. Praca wskazuje na potrzebę dalszych badań obejmujących szerszy zakres dawek nawozów, profilowych analiz migracji składników w glebie oraz udoskonalania formuł powłok nawozów, aby precyzyjniej dopasować dynamikę uwalniania składników do potrzeb roślin w intensywnych systemach produkcji rolniczej. Rezultaty te mają istotne znaczenie praktyczne dla optymalizacji nawożenia kukurydzy i innych roślin uprawnych, uwzględniając jednocześnie wymagania ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju rolnictwa

Słowa kluczowe: kukurydza, plon, nawożenie azotem, powłoka biodegradowalna, mocznik, nawozy wolnodziałające, nawozy otoczkowane

2. Abstrakt

The subject of this study is the evaluation of the effects of coated fertilizers on the yield and quality of maize intended for silage. Coated fertilizers represent an innovative solution in precision agriculture, enabling controlled nutrient release – particularly nitrogen – adjusted to the plant's requirements during various growth stages. Their application allows for higher fertilization efficiency and reduced nutrient losses, which translates into both economic and environmental benefits. The thesis includes a literature review addressing the mechanisms of nutrient release from coated fertilizers, the types of coatings used – with particular emphasis on biodegradable coatings – and the technological aspects of their production. Various coating materials such as synthetic polymers, biopolymers, polysaccharides, lignin, and proteins are presented, along with their properties and potential for use in controlling the release rate of fertilizers. The experimental section describes field trials conducted under the climatic and soil conditions of the Lublin region on maize of the Pioneer P8240 variety over three consecutive growing seasons. The research covered different types of mineral fertilizers (urea and NPK) and their biodegradable-coated variants based on vegetable oils and lignite dust, applied at two nitrogen rates (135 and 180 kg N·ha⁻¹). The study analyzed the effects of these factors on the content of macro- and micronutrients in plants and soil, as well as on maize yield and quality parameters. The results indicate relatively stable concentrations of ammonium nitrogen (N-NH₄) in the 0–30 cm and 30–60 cm soil layers, regardless of fertilizer type, coating material, or nitrogen rate. The lack of statistically significant differences was confirmed by analysis of variance and Tukey's test, although weak interactions between factors were observed, suggesting possible local accumulations of ammonium nitrogen when using Type 2 coated fertilizers at the lower nitrogen rate. Similarly, spatial differentiation and high variability of organic nitrogen indicate the dominance of local microbiological and physical factors over fertilization in shaping soil nitrogen pools. Optimal dosing and splitting of nitrogen applications, combined with the appropriate fertilizer type and application method, enhance production efficiency while minimizing nutrient losses and environmental impact. Coated fertilizer production technologies – such as polymer solution spraying in fluidized beds, reactive extrusion, and microencapsulation-enable precise control of nutrient release profiles. Increasing importance is being placed on biodegradable coatings, which meet the requirements of sustainable agriculture and legal regulations aimed at reducing

microplastics. The development of these technologies toward multilayer coatings and their integration with precision fertilization systems offers new opportunities to further improve fertilization efficiency and environmental protection. The study highlights the need for further research involving a broader range of fertilizer doses, detailed analyses of nutrient migration in soil profiles, and refinement of coating formulations to better match nutrient release dynamics to plant needs in intensive agricultural production systems. These results have significant practical importance for optimizing maize fertilization and that of other crops, while also addressing environmental protection and sustainable agricultural development.

Keywords: corn, yield, nitrogen fertilization, biodegradable coating, urea, SRF-slow release fertilizers, CRF -controlled release fertilizers

3. Wprowadzenie

Współczesne rolnictwo coraz intensywniej sięga po innowacje technologiczne, które pozwalają na zwiększenie efektywności produkcji przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Jednym z takich rozwiązań są nawozy otoczkowane, które dzięki zastosowaniu powłok kontrolujących kinetykę uwalniania składników odżywczych, umożliwiają precyzyjne dawkowanie nawozu, dostosowane do potrzeb roślin w różnych fazach wzrostu. Technologia produkcji nawozów otoczkowanych opiera się na wykorzystaniu różnych rodzajów materiałów do powlekania granul, które pozwalają w pewnym stopniu kontrolować dostępność składników mineralnych, co przekłada się na zmniejszenie strat nawozów powodowanych wymywaniem czy ulatnianiem (Nowacka i in., 2012). Zagadnienie to jest istotne zarówno z punktu widzenia nauki, jak i praktyki rolniczej i znajduje szerokie odzwierciedlenie w literaturze krajowej i zagranicznej. Badania wskazują, że zastosowanie nawozów otoczkowanych może znacząco wpłynąć na poprawę wskaźników plonowania oraz na jakość uzyskiwanych produktów rolnych, m.in. przez zwiększenie efektywności wykorzystania składników pokarmowych, poprawę parametrów fizykochemicznych oraz wydłużenie okresu wegetacji (Jankowska, 2019). Ponadto, w świetle światowych publikacji podkreśla się także szereg korzyści środowiskowych, takich jak redukcję emisji zanieczyszczeń azotowych do wód gruntowych czy ograniczenie negatywnych zmian, wywołanych nadmiernym nawożeniem (Szulc, 2012). W Polsce rozwój technologii wytwarzania nawozów otoczkowanych jest szczególnie ważny z uwagi na specyfikę warunków klimatycznych i glebowych oraz konieczność dostosowania praktyk nawozowych do wymagań integrowanej ochrony roślin i zasad zrównoważonego rolnictwa, których propagowanie jest zarówno zadaniem nauki, jak i wyzwaniem dla gospodarstw rolnych (Podleśny, 2015). Znaczenie tej technologii potwierdzają wyniki badań prowadzonych w warunkach polowych, które wskazują na korzystne efekty zastosowania nawozów otoczkowanych w uprawach ważnych gospodarczo roślin, takich jak kukurydza, jęczmień czy ziemniak (Miziniak, 2014). Równoległe z badaniami naukowymi ważnym aspektem jest przestrzeganie obowiązujących regulacji prawnych. W Unii Europejskiej obowiązuje Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009, które wyznacza standardy jakościowe i środowiskowe dla nawozów mineralnych, w tym nawozów otoczkowanych, zwracając szczególną uwagę na ich bezpieczeństwo użytkowania oraz ograniczenie negatywnych skutków dla środowiska.

Zgodność z tymi regulacjami jest warunkiem wprowadzenia nowych produktów nawozowych na rynek unijny, a także stanowi podstawę do odpowiedzialnej praktyki rolniczej (Rozporządzenie UE 2019/1009).

Potrzeba i znaczenie nawozów otoczkowanych

Azot jest kluczowym składnikiem pokarmowym determinującym plonowanie roślin uprawnych, a w szczególności gatunków o wysokim potencjale biomasy, takich jak kukurydza, pszenica czy rzepak (Shaviv, 2001). W warunkach intensywnej produkcji rolniczej, prowadzonej w systemach monokulturowych lub uproszczonych płodozmianach, popyt na azot stale rośnie, a jego efektywne wykorzystanie staje się wyzwaniem o znaczeniu globalnym. Dane FAO i Fertilizers Europe wskazują, że zużycie nawozów azotowych w UE w latach 2020–2030 wzrośnie o 5–8%, mimo wprowadzanych strategii ograniczania strat azotu w środowisku (Fertilizers Europe, 2022). Klasyczne nawozy mineralne (mocznik, saletra amonowa, saletra wapniowa) dostarczają łatwo dostępnego azotu, ale ich podstawową wadą jest brak kontroli nad szybkością uwalniania składnika do środowiska glebowego po ich aplikacji. W warunkach sprzyjających stratom składnika nawozowego (wysoka temperatura, wilgotność gleby, intensywne opady po aplikacji) nawet 30–50% wprowadzonego azotu może zostać utracone w pierwszych tygodniach po zastosowaniu nawozu (Czuba, 2001). Straty te zachodzą głównie trzema drogami:

- ulatnianie amoniaku (NH_3) – szczególnie intensywne po powierzchniowym zastosowaniu mocznika na glebach o $\text{pH} > 7$;
- wymywanie azotanów (NO_3^-) – zwłaszcza na glebach lekkich i w okresach intensywnych opadów;
- denitryfikacja – redukcja azotanów do N_2 i N_2O w warunkach beztlenowych.

Konsekwencją strat azotu jest nie tylko obniżenie efektywności nawożenia, ale też poważne zagrożenia środowiskowe, takie jak eutrofizacja jezior i rzek, zakwaszenie gleb, zanieczyszczenie wód podziemnych azotanami oraz emisja podtlenku azotu (N_2O) do atmosfery, który jest gazem cieplarnianym o potencjale cieplarnianym ~300 razy większym niż CO_2 (Duque-Acevedo, 2022). Rozwiązaniem ograniczającym te problemy są nawozy o przedłużonym (SRF) lub kontrolowanym uwalnianiu (CRF). Ich celem jest dopasowanie kinetyki uwalniania N do zapotrzebowania roślin w różnych fazach rozwojowych, tak aby maksymalizować efektywność wykorzystania azotu (NUE) przy

jednoczesnym ograniczeniu liczby aplikacji (Duque-Acevedo, 2022). W praktyce, w uprawach polowych nawozy CRF pozwalają na zmniejszenie dawek azotu o 15–25% przy utrzymaniu lub zwiększeniu plonu (Pitman, 1986) Korzyści stosowania tego typu nawozów są wielowymiarowe:

- ekonomiczne – mniejsze koszty robocizny (1 aplikacja zamiast 2–3), niższe zużycie nawozu w przeliczeniu na plon;
- środowiskowe – redukcja strat N i emisji N_2O , mniejsze zanieczyszczenie wód;
- agrotechniczne – możliwość wcześniejszego, jednorazowego nawożenia, bez ryzyka poparzenia siewek lub nadmiernej mineralizacji.

W wielu krajach (USA, Japonia, Holandia) stosowanie nawozów o kontrolowanym uwalnianiu jest promowane systemami dopłat lub ulg podatkowych (Fertilizers Europe, 2022) , a w UE trwają prace nad wdrożeniem norm ograniczających użycie nawozów łatwo rozpuszczalnych w strefach ochrony wód (Smol, 2015).

Mechanizm uwalniania składnika nawozowego

Proces uwalniania składnika pokarmowego z nawozu otoczkowanego jest złożony i zależy zarówno od właściwości powłoki, jak i od warunków środowiskowych. Najczęściej opisuje się go modelem sigmoidalnym obejmującym trzy fazy (Rana, 2023):

1. Faza opóźnienia (lag phase) – po aplikacji do gleby granula otoczkowanego nawozu pochłania wodę z otoczenia. Jej penetracja przez powłokę jest ograniczona przez jej grubość, stopień porowatości i charakter chemiczny (hydrofobowość/hydrofilowość). W tym okresie uwalnianie składnika jest minimalne.
2. Faza intensywnej dyfuzji – gdy roztwór nawozu osiągnie określone ciśnienie osmotyczne wewnątrz granuli, zaczyna on migrować przez mikropory, defekty powłoki lub sieć polimerową. Tempo dyfuzji zależy od temperatury (wzrost o $10^{\circ}C$ może zwiększyć tempo uwalniania nawet dwukrotnie), wilgotności oraz rodzaju polimeru (Lubkowski, 2019).
3. Faza końcowa – wraz z ubywaniem substancji wewnątrz granuli maleje gradient stężeń, a proces dyfuzji spowalnia aż do całkowitego wyczerpania nawozu.

W przypadku powłok polimerowych tempo uwalniania można precyzyjnie regulować poprzez:

- grubość powłoki (20–200 μm);
- udział plastifikatorów;
- stopień krystaliczności polimeru;
- obecność wypełniaczy mineralnych (np. kaolin, bentonit);
- modyfikacje chemiczne (sieciowanie, kopolimeryzacja).

Zjawiska te są analogiczne do mechanizmów stosowanych w farmacji w kontrolowanym uwalnianiu leków, co znalazło odzwierciedlenie w adaptacji technologii kapsułkowania farmaceutycznego do produkcji nawozów (Huygens, 2019).

Rodzaje powłok

Powłoki stosowane w technologii nawozów otoczkowanych pełnią kluczową rolę w kontrolowaniu tempa uwalniania składników pokarmowych, zabezpieczając je przed wymywaniem oraz dostosowując dostępność do potrzeb roślin w czasie ich wzrostu. Jednym z pierwszych rozwiązań zastosowanych w tym zakresie były powłoki siarkowe (SCU). Siarka, topiąca się w temperaturze 156°C, наносzona jest w postaci stopionej w bębnach obrotowych, tworząc mechaniczną barierę dyfuzyjną. Dodatkowo pełni ona funkcję makroelementu niezbędnego w żywieniu roślin. Wadą takiego rozwiązania jest jednak kruchość warstwy siarkowej, podatnej na mikropęknięcia, które przyspieszają tempo uwalniania składników pokarmowych (Pitman, 1986).

W celu poprawy właściwości użytkowych opracowano powłoki siarkowo-polimerowe (PSCU), będące dwuwarstwowymi systemami złożonymi z wewnętrznej warstwy siarki oraz cienkiej zewnętrznej warstwy polimeru (np. poliolefiny, żywice epoksydowe). Dzięki temu powłoka charakteryzuje się większą szczelnością, odpornością na ścieranie i stabilnością procesu uwalniania składników (Pitman, 1986). Jeszcze bardziej zaawansowaną grupę stanowią powłoki polimerowe syntetyczne (PCF), w których wykorzystuje się zarówno termoplasty (np. PE, EVA, EVOH), jak i duroplasty (alkidy, poliuretany). Nakłada się je metodą fluidyzacji lub ekstruzji, co zapewnia powtarzalny profil uwalniania oraz wysoką odporność na czynniki środowiskowe (Wierzbowska, 2019). Równolegle rozwijano także powłoki półsyntetyczne, oparte na metylocelulozie i etylocelulozie – substancjach od dawna stosowanych w farmacji, przystosowanych do nawożenia w uprawach specjalistycznych. Są one rozpuszczalne w rozpuszczalnikach organicznych, co pozwala otrzymywać

cienkie i jednorodne filmy kontrolujące dyfuzję składników pokarmowych (Huygens, 2019).

W ostatnich latach szczególne znaczenie zyskały jednak powłoki biodegradowalne, rozwijane w odpowiedzi na rosnące wymogi zrównoważonego rolnictwa i regulacje środowiskowe, w tym rozporządzenie Parlamentu Europejskiego nakazujące, aby od lipca 2024 roku wszystkie substancje stosowane do powlekania nawozów były biodegradowalne. Nawozy otoczkowane o kontrolowanym uwalnianiu (CRF) z biodegradowalnymi powłokami pozwalają nie tylko na precyzyjne dopasowanie podaży składników mineralnych do potrzeb roślin, lecz również na eliminację problemu zanieczyszczeń mikroplastikami (Azeem, 2014; Shi, 2021).

Wśród najczęściej badanych materiałów znajdują się alifatyczne polimery biodegradowalne. Poli(kwas mlekowy) (PLA) jest przykładem szeroko analizowanego tworzywa, wykazującego autokatalityczną degradację umożliwiającą modelowanie profilu uwalniania składników pokarmowych (Oladosu, 2017). Wykorzystanie nanocząsteczek PLA daje zróżnicowany stopień biodegradowalności zależny od warunków środowiska (Guo, 2024). Istotne znaczenie ma także poli(kwas glikolowy) (PGA) i jego kopolimer z kwasem mlekowym (PLGA), którego degradacja zależy od udziału jednostek kwasu mlekowego, co pozwala kontrolować tempo uwalniania nawozów nawet w środowisku morskim (Kitthidang, 2024). Polikaprolakton (PCL) charakteryzuje się z kolei najwolniejszym tempem degradacji spośród wymienionych polimerów, co czyni go materiałem predysponowanym do długoterminowych aplikacji, natomiast poli(bursztynian butylenu) (PBS) sprzyja efektywnemu dostarczaniu składników pokarmowych do roślin (Guo, 2024). Osobną i niezwykle perspektywiczną grupę stanowią polihydroksyalkaniany (PHA), otrzymywane w wyniku procesów fermentacyjnych. Jednym z ważniejszych przedstawicieli jest poli(3-hydroksymaślan) (PHB), który pozwala na stopniowe uwalnianie azotu w okresie nawet do 120 dni, a przy tym ulega biodegradacji w glebie w około 35%, nie powodując zanieczyszczeń środowiskowych (Kitthidang, 2024). Wszystkie opisane rozwiązania ukazują ewolucję technologii powłok – od prostych warstw barierowych, takich jak SCU, poprzez bardziej złożone polimerowe systemy PSCU i PCF, aż po innowacyjne powłoki biodegradowalne, które odpowiadają zarówno na potrzeby rolnictwa precyzyjnego, jak i na aktualne wyzwania środowiskowe.

Biopolimery naturalne

Biopolimery naturalne, takie jak polisacharydy, krochmal, lignina czy białka, stanowią obecnie coraz częściej badane i wdrażane materiały do wytwarzania biodegradowalnych powłok nawozowych. Ich atrakcyjność wiąże się z łatwą dostępnością surowców, niskim kosztem, pełną biodegradowalnością oraz możliwością kontrolowania profilu uwalniania składników pokarmowych.

Polisacharydy

Do grupy polisacharydów wykorzystywanych w powłokach nawozowych zalicza się przede wszystkim chitynę i chitozan, pozyskiwane głównie z odpadów z przemysłu skorupiaków. Chitozan, ze względu na swoje właściwości filmotwórcze, pozwala na tworzenie stabilnych powłok regulujących tempo uwalniania składników odżywczych. Dodatkowo wykazuje działanie biostymulacyjne, które można modyfikować poprzez sieciowanie. Przykładem są powłoki chitozanowe z dodatkiem kwasu cytrynowego i askorbinowego, które optymalizują wzrost roślin, podczas gdy te z kwasem octowym mogą niekorzystnie wpływać na rozwój roślin (Woch, 2025).

Innym szeroko stosowanym polisacharydem jest alginian sodowy, pozyskiwany z wodorostów morskich. Dzięki swojej hydrofilności znajduje zastosowanie w formie matryc wapniowo-alginianowych wzbogaconych krochmalem, które zapewniają stabilne uwalnianie składników pokarmowych bez nadmiernej wrażliwości na zmienne warunki środowiska (Woch, 2025). Dodatkowo kompozyty alginianu z celulozą pozwalają uzyskać efekt kontrolowanego nawożenia połączony z poprawą retencji wody w glebie, co stanowi znaczącą zaletę w warunkach deficytu wilgoci (Leelaphiwat, 2022). Również pektyna, otrzymywana z odpadów owocowych, w połączeniu z alginianem sodowym tworzy biodegradowalne, wytrzymałe i elastyczne filmy o dobrych właściwościach mechanicznych i barierowych (García-González, 2022).

Do tej grupy należy także celuloza i jej pochodne, wykorzystywane od dawna w różnych dziedzinach przemysłu. Octan celulozy znalazł zastosowanie jako nośnik kontrolowanego uwalniania mikroelementów dzięki metodzie inwersji fazowej (de Oliveira, 2023). Co istotne, wszystkie kompozyty celulozowe wykazują pełną biodegradowalność w warunkach glebowych, co stawia je w opozycji do polimerów syntetycznych o trudnym do kontrolowania rozkładzie (Sáez-Orviz, 2024).

Krochmal i jego modyfikacje

Krochmal jest jednym z najbardziej obiecujących biodegradowalnych polimerów w aplikacjach nawozowych. Wynika to z jego dostępności rynkowej, nietoksyczności oraz biokompatybilności (Campos, 2025). Hydrożele krochmalowe pozwalają nie tylko na stopniowe uwalnianie składników odżywczych, lecz także na poprawę retencji wilgoci w glebie, co ma kluczowe znaczenie w warunkach suszy (Chen, 2024).

W ostatnich latach duże zainteresowanie wzbudzają również kompozyty PLA/krochmal, które pozwalają na zoptymalizowanie profilu uwalniania składników pokarmowych. Dodatek krochmalu eliminuje charakterystyczny dla czystego PLA okres zerowego uwalniania, co umożliwia wcześniejszy dostęp roślin do składników mineralnych. Optymalna formuła PLA85/krochmal15 osiąga 77% stopień uwalniania w ciągu 28 dni, dzięki czemu spełnia międzynarodowe standardy dla nawozów o spowolnionym uwalnianiu (Wiroonpochit, 2024).

Lignina

Duży potencjał jako materiał powłokowy wykazuje lignina, która jest jednym z głównych polimerów roślinnych i zarazem największym odnawialnym związkiem aromatycznym w przyrodzie. Jej modyfikacje pozwalają uzyskiwać powłoki o wysokiej wytrzymałości chemicznej i optymalnych właściwościach barierowych. Przykładem jest hydroksymetylowana lignina kraftowa, sieciowana żywicą fenolowo-formaldehydową (HML-PF), która skutecznie kontroluje kinetykę uwalniania fosforu (Fertahi, 2018). Co więcej, funkcjonalizacja ligniny kwasem huminowym poprawia właściwości hydrofobowe powłok, redukuje straty nawozowe w wyniku ługowania nawet o 80% oraz zwiększa plon pszenicy o około 50%, co wskazuje na jej ogromny potencjał agronomiczny (Bilal, 2024).

Białka jako materiały powłokowe

Odrębną kategorię biodegradowalnych materiałów powłokowych tworzą białka pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Białko sojowe znajduje zastosowanie m.in. jako komponent powłok nasiennych, gdzie pełni dodatkową funkcję biostymulacyjną, zwiększając świeżą i suchą masę roślin, powierzchnię liści oraz zawartość azotu w tkankach (Taylor, 2016). W połączeniu z hydrolizatami białkowymi pozyskiwanymi z larw mącznika, białko sojowe wykazuje zdolność do tworzenia matryc alginianowych o kontrolowanych właściwościach uwalniania składników pokarmowych (Woch, 2025).

Ważną rolę odgrywają również białka zwierzęce, takie jak żelatyna i kazeina, które cechują się doskonałymi właściwościami filmotwórczymi i biodegradowalnością (Tan, 2024). Ich zastosowanie w powłokach pozwala uzyskać kontrolowane tempo dyfuzji nawozów, a kompozyty żelatyny z białkiem sojowym dodatkowo poprawiają właściwości mechaniczne i barierowe powłok nawozowych (Melia, Andriani, 2020).

Technologie wytwarzania nawozów otoczkowanych

Technologie wytwarzania nawozów otoczkowanych stanowią obecnie kluczowy element rolnictwa precyzyjnego, pozwalając na dostosowanie kinetyki uwalniania składników pokarmowych do potrzeb roślin, co zwiększa efektywność nawożenia i minimalizuje negatywny wpływ na środowisko (Boberski, 2025; ICL Growing Solutions, 2025). Ich rozwój wynika z konieczności ograniczenia strat składników mineralnych oraz poprawy gospodarki nawozowej, a także z rosnących wymagań w zakresie zrównoważonego rolnictwa (ICL Growing Solutions, 2025).

Jedną z pierwszych metod przemysłowych była technologia natrysku stopionych materiałów w bębnach obrotowych (rotary drum coating), wykorzystywana do produkcji mocznika powlekanego siarką (SCU). Proces ten polega na transportowaniu granul nawozu przez bęben obrotowy, gdzie są one pokrywane warstwą siarki o temperaturze 150–180°C (IMARC Group, 2025). Siarka tworzy barierę ograniczającą tempo dyfuzji azotu, a jednocześnie dostarcza roślinom drugiego makroskładnika pokarmowego (Loyal Fertilizer, 2024). Jednakże powłoka siarkowa jest krucha i podatna na pękanie, co powoduje zbyt szybkie uwalnianie azotu (Kostka, 2025). Aby zwiększyć wytrzymałość mechaniczną i stabilność nawozów, opracowano systemy dwuwarstwowe PSCU, w których siarka łączona jest z zewnętrzną warstwą polimeru (K.D. Publications, 2025).

Kolejną istotną techniką jest natrysk roztworów polimerowych w złożu fluidalnym. W tym procesie granule nawozu są unoszone w powietrznym złożu fluidalnym, a roztwór polimerowy natryskiwany jest przez dysze, co pozwala na równomierne powlekanie i tworzenie cienkich, jednorodnych warstw (Kowal, 2016; TU Hamburg, 2025). Technologia ta umożliwia również nanoszenie wielu warstw i równoczesne suszenie, a dzięki dużej elastyczności pozwala na stosowanie zarówno polimerów syntetycznych, jak i biodegradowalnych, np. etylocelulozy czy modyfikowanej ligniny (Banach, 2025). Właściwości końcowe nawozu kontrolowane są poprzez parametry takie jak prędkość dozowania roztworu, stężenie polimeru czy temperatura fluidyzacji (Phos4Green, 2024).

Do nowoczesnych rozwiązań należy także ekstruzja reaktywna (reactive extrusion), w której składniki nawozowe wprowadzane są bezpośrednio do matrycy polimerowej. Wykorzystanie ekstruderów śrubowych pozwala na równoczesne topienie, mieszanie, reakcję chemiczną i formowanie granuli, co daje możliwość wytwarzania nawozów matrycowych o kontrolowanym uwalnianiu, np. na bazie polifosforanów amonowych (Sea2Land Project, 2024). Technologia ta wyróżnia się wysoką efektywnością energetyczną i możliwością precyzyjnego projektowania właściwości nawozu (Polymer Degradation and Stability, 2025).

Coraz większe znaczenie znajduje również mikrokapsułkowanie, polegające na otaczaniu drobnych cząstek nawozu powłoką w systemach emulsyjnych. Stosowane metody obejmują suszenie rozpyłowe, kapsułkowanie fluidyzacyjne czy podwójną emulsję (Instytut Biotechnologii i Produktów Rolno-Spożywczych, 2025). Mikrokapsuły o średnicy około 100 μm mogą zawierać nawet do 50% substancji aktywnej, a zastosowane techniki zapewniają wysoką wydajność i precyzyjne uwalnianie, szczególnie w przypadku termolabilnych składników pokarmowych (Lobel, 2024).

Innym zaawansowanym rozwiązaniem jest polimeryzacja *in situ*, polegająca na bezpośrednim tworzeniu powłoki polimerowej na powierzchni granuli nawozu. Inicjacja procesu może być przeprowadzana metodami fotochemicznymi, termicznymi czy redoks, co umożliwia otrzymywanie bardzo cienkich, a zarazem odpornych mechanicznie i dobrze przylegających powłok (ICM UW, 2025; Plastech, 2025).

Z punktu widzenia praktyki rolniczej kluczowe znaczenie mają wymagania normatywne i kontrola jakości. Norma PN-EN 13266:2003 określa metodykę badań kinetyki uwalniania składników, natomiast międzynarodowy standard ISO 18644:2016 wyznacza kryteria skuteczności nawozów CRF, np. maksymalnie 15% uwolnienia substancji w ciągu pierwszej doby i do 75% po 28 dniach (ISO, 2021). Dodatkowo standardy określają wymogi odnośnie minimalnej zawartości składników pokarmowych (20% $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$ w nawozach wieloskładnikowych i 18% w nawozach jednoskładnikowych) oraz granulometrii produktów (Ciesielczuk, 2016).

Perspektywy rozwoju w tej dziedzinie jednoznacznie wskazują na rosnące zastosowanie powłok biodegradowalnych opartych na surowcach odnawialnych, takich jak chitozan, celuloza, lignina czy kopolimery pochodzące z olejów roślinnych (Skrzypczak, 2020; ACS Omega, 2025). Kluczowe wyzwania obejmują poprawę właściwości mechanicznych tych powłok, dopasowanie kinetyki biodegradacji do wymagań poszczególnych upraw, a także rozwój rozwiązań wielowarstwowych

i integrację technologii z precyzyjnymi systemami aplikacji nawozowej (Nature, 2025). Nowe kierunki badań jasno pokazują, że innowacje w powłokach nawozowych będą odgrywały coraz większą rolę w budowaniu przyszłości zrównoważonego rolnictwa opartego na zasadach gospodarki obiegu zamkniętego.

Kukurydza z przeznaczeniem na kiszonkę – uprawa i znaczenie

Kukurydza przeznaczona na kiszonkę (*Zea mays* L.) stanowi jedną z najważniejszych roślin pastewnych na świecie, charakteryzującą się najwyższą akumulacją energii słonecznej na jednostkę powierzchni spośród wszystkich upraw paszowych (Mitrović, 2017). Jej znaczenie w żywieniu zwierząt, szczególnie przeżuwaczy, wynika z wysokiej energetyczności, dobrej strawności oraz możliwości długoterminowego przechowywania w formie zakiszonej (Khan, 2015).

Kiszonka z kukurydzy charakteryzuje się wysoką zawartością energii metabolicznej (8,5 – 11,5 MJ·kg⁻¹ suchej masy), co czyni ją podstawowym źródłem energii w dawkach pokarmowych dla bydła mlecznego i opasowego (Ferraretto, 2015). Zawartość suchej masy w optymalnie zebranej kukurydzy kiszonkowej wynosi 30 – 35%, przy czym stosunek ziarna do pozostałych części rośliny determinuje jakość końcowego produktu (Sánchez-Duarte, 1991). Składniki odżywcze kukurydzy kiszonkowej przedstawiają się następująco (McDonald, 1991):

- sucha masa: 30 – 35%;
- białko ogólne: 6 – 9% s.m.;
- włókno surowe: 18 – 25% s.m.;
- tłuszcz surowy: 2 – 4% s.m.;
- popiół surowy: 3 – 5% s.m.;
- substancje bezazotowe wyciągowe: 55 – 65% s.m.

Szczególnie ważna jest zawartość skrobi, która w dobrze wykształconych kolbach może stanowić 25 – 35% suchej masy całej rośliny, stanowiąc główne źródło łatwo dostępnej energii dla mikroorganizmów żwacza (Bal, 1997).

Kukurydza kiszonkowa stanowi podstawę żywienia przeżuwaczy w intensywnych systemach produkcji zwierzęcej. W dawkach dla krów mlecznych może stanowić 40 – 60% suchej masy paszy objętościowej, zapewniając pokrycie 50 – 70% zapotrzebowania energetycznego (Dhiman, 1997). Badania wykazują, że zastąpienie tradycyjnych pasz objętościowych kukurydzą kiszonkową może zwiększyć wydajność mleczną o 10 – 15% przy jednoczesnym obniżeniu kosztów żywienia (Wardynski, 1993).

W żywieniu bydła opasowego kukurydza kiszonkowa umożliwia uzyskanie dziennych przyrostów masy ciała na poziomie 1,0 – 1,4 kg na dobę, przy efektywności wykorzystania paszy wyrażonej jako stosunek przyrostu do zużycia paszy na poziomie 0,12 – 0,16 (Stock, 1990). Ekonomiczne korzyści wynikają z możliwości redukcji kosztów żywienia o 20 – 30% w porównaniu z systemami opartymi na paszach treściwych i sianach (Ferreira, 2005).

W Polsce uprawa kukurydzy na kiszonkę systematycznie wzrasta, osiągając w 2023 roku powierzchnię około 1,2 mln ha, co stanowi wzrost o 15% w stosunku do roku 2020 (GUS, 2024). Największe areale uprawy koncentrują się w województwach: wielkopolskim (18% krajowej powierzchni), mazowieckim (16%) oraz dolnośląskim (12%) (MORW, 2023).

Średnie plony kukurydzy kiszonkowej w Polsce wynoszą 45 – 55 t·ha⁻¹ świeżej masy (15 – 18 t·ha⁻¹ suchej masy), przy czym w najbardziej sprzyjających warunkach glebowo-klimatycznych można uzyskiwać plony przekraczające 70 t·ha⁻¹ świeżej masy (Jańczak-Pieniążek, 2021). Wartość produkcji kukurydzy kiszonkowej w Polsce szacuje się na około 3,5 mld złotych rocznie, co czyni ją jedną z najważniejszych roślin pastewnych w kraju (IERiGŻ-PIB, 2023).

Wymagania klimatyczne kukurydzy

Kukurydza jako roślina pochodzenia tropikalnego charakteryzuje się wysokimi wymaganiami cieplnymi. Minimalna temperatura kiełkowania nasion wynosi 8 – 10°C, jednak optymalne warunki panują przy temperaturze 12 – 15°C (Ritchie, 1993). Suma temperatur aktywnych (>10°C) potrzebna do wykształcenia dobrze rozwiniętych roślin wynosi 2200 – 2800°C w zależności od odmiany (Bovey, 2003).

Wymagania temperaturowe kukurydzy w poszczególnych fazach rozwojowych:

- kiełkowanie i wschody: 12 – 15°C;
- wzrost wegetatywny: 20 – 25°C (optimum);
- kwitnienie i zapylanie: 18 – 22°C;
- nalewanie ziarna: 16 – 20°C;
- dojrzewanie: 15 – 18°C.

Temperatury poniżej 5°C powodują zahamowanie wzrostu, natomiast temperatury powyżej 35°C mogą prowadzić do stresu cieplnego i obniżenia plonowania roślin (Hatfield, 2015). Szczególnie wrażliwa na wahania temperatury jest kukurydza w fazie kwitnienia, gdzie temperatury poniżej 15°C lub powyżej 30°C mogą powodować zaburzenia zapylania i znaczne straty plonu (Schoper, 1987).

Wymagania wodne kukurydzy

Kukurydza charakteryzuje się wysokimi wymaganiami wodnymi, jej współczynnik transpiracji wynosi 300 – 400, co oznacza, że do wytworzenia 1 kg suchej masy potrzebuje 300 – 400 l wody (Howell, 1990). Całkowite zapotrzebowanie wodne kukurydzy w okresie wegetacji wynosi 450 – 650 mm, z czego około 60% przypada na okres od wyrzucania wiech do końca kwitnienia (Kresović, 2016).

Rozkład potrzeb wodnych w czasie:

- wschodów do 6 liścia: 50 – 70 mm;
- od 6 liścia do wyrzucania wiech: 150 – 200 mm;
- kwitnienie i zapłodnienie: 180 – 250 mm;
- nalewanie ziarna: 120 – 180 mm.

Niedobory wodne w krytycznych fazach rozwoju kukurydzy (kwitnienie, nalewanie ziarna) mogą prowadzić do obniżenia plonów nawet o 30 – 50% (Çakir, 2004). Z kolei nadmiar wody, szczególnie w początkowych fazach wzrostu, może powodować problemy z ukorzeniem i zwiększać podatność kukurydzy na choroby grzybowe (Bänziger, 2000).

Wymagania glebowe kukurydzy

Kukurydza najlepiej plonuje na glebach głębokich, strukturalnych, o dobrej przepuszczalności i wysokiej zdolności retencyjnej (Lal, 2020). Optymalne są gleby brunatne, czarne ziemie oraz mady rzeczne o głębokości profilu glebowego minimum 60 cm – 80 cm (Brady, 2016).

Wymagania fizyczne gleby:

- głębokość warstwy ornej: minimum 25 – 30 cm;
- gęstość objętościowa: 1,2 – 1,4 g·cm⁻³;
- przewodność hydrauliczna: 10 – 100 mm·h⁻¹;
- pojemność wodna: 18 – 22% obj.;
- porowatość ogólna: >45%.

Gleby zbyt ciężkie (ilaste) mogą powodować problemy z ukorzeniem i zwiększać ryzyko zaskorupiania powierzchniowego, natomiast gleby zbyt lekkie (piaszczyste) charakteryzują się niską pojemnością wodną i skłonnością do przemywania składników pokarmowych (Reynolds, 2007).

Optymalne pH gleby dla kukurydzy wynosi 6,0 – 7,0 w KCl, przy czym roślina toleruje zakres pH 5,5 – 7,5 (Foy, 1984). Przy pH poniżej 5,0 następuje ograniczenie pobierania fosforu i molibdenu oraz zwiększa się ryzyko toksycznego działania glinu

i manganu (von Uexküll, 1995). Zbyt wysokie pH gleby ($\text{pH} > 7,5$) może z kolei prowadzić do niedoborów żelaza, manganu i cynku w roślinie (Marschner, 2011).

Wysoka zawartość materii organicznej ($>2,5\%$) sprzyja rozwojowi kukurydzy ze względu na intensywny metabolizm rośliny oraz jej wysokie wymagania pokarmowe (Lal, 2004). Materia organiczna poprawia strukturę gleby, zwiększa pojemność wodną, poprawia parametry cieplne gleby i stanowi źródło składników pokarmowych uwalnianych w procesie mineralizacji (Six, 2006).

Badania wykazują, że wzrost zawartości materii organicznej o 1% może prowadzić do:

- zwiększenia plonu o 8 – 12%;
- poprawy retencji wodnej o 15 – 20%;
- zwiększenia dostępności azotu o 20 – 30 kg N/ha rocznie (Oldfield, 1995).

Kukurydza jest wrażliwa zarówno na nadmiar, jak i niedobór wody w glebie. Optymalny poziom wody gruntowej powinien znajdować się na głębokości 80 – 120 cm poniżej powierzchni gleby (Evans, 2019). Wysoki poziom wody gruntowej (<50 cm) może prowadzić do:

- zahamowania wzrostu systemu korzeniowego;
- zwiększenia podatności na choroby korzeni;
- obniżenia efektywności pobierania składników pokarmowych;
- opóźnienia dojrzewania i obniżenia jakości kiszonki (Tan, 2011).

W przypadku gleb o wysokim poziomie wód gruntowych konieczne jest stosowanie drenażu, który powinien zapewnić odpływ nadmiaru wody oraz napowietrzenie strefy korzeniowej (Skaggs, 2012). System drenażu powinien być zaprojektowany tak, aby:

- obniżyć poziom wody gruntowej do głębokości 80 – 100 cm;
- zapewnić szybki odpływ wody po intensywnych opadach;
- utrzymać odpowiednią zawartość powietrza w glebie ($>10\%$ obj.) (Muma, 2017).

Potrzeby pokarmowe i nawozowe kukurydzy

Azot

Najważniejszym składnikiem pokarmowym dla kukurydzy, bezpośrednio wpływającym na wielkość plonu i zawartość białka jest azot (Ciampitti, 2012). Całkowite

pobranie azotu przez kukurydzę kiszonkową wynosi $200 - 300 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ przy plonach $50 - 70 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ świeżej masy (Bender, 2013).

Rozkład pobierania azotu przez kukurydzę w czasie kształtuje się następująco:

- do fazy 6 liścia: $15 - 20 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$;
- od 6 liścia do wyrzucania wiech: $120 - 180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$;
- kwitnienie i nalewanie ziarna: $80 - 120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$;
- dojrzewanie: $20 - 30 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Intensywność pobierania azotu jest największa w okresie od fazy 8 liścia do końca kwitnienia, kiedy roślina może pobierać $3 - 5 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ dziennie (Abendroth, 2011). Niedobór azotu w tym okresie prowadzi do przedwczesnego żółknięcia dolnych liści i znacznego obniżenia plonu (Subedi, 2011).

Fosfor

Zapotrzebowanie kukurydzy na fosfor wynosi $80 - 120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy czym najintensywniejsze pobieranie występuje w początkowych fazach wzrostu (Mallarino, 2003). Fosfor odgrywa kluczową rolę w:

- rozwoju systemu korzeniowego;
- procesach energetycznych (ATP);
- tworzeniu i dojrzewaniu nasion;
- przyspieszaniu dojrzewania (Grant, 2001).

Niedobór fosforu objawia się fioletowym zabarwieniem liści, opóźnionym wzrostem i dojrzewaniem oraz obniżeniem plonu o $15 - 25\%$ (Yin, 2003).

Potas

W największych ilościach przez kukurydzę pobierany jest potas, od 180 do $250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy czym większość pobierania przypada na pierwszą połowę okresu wegetacji (Karlen, 1988). Funkcje potasu w roślinie obejmują:

- regulację gospodarki wodnej;
- transport składników odżywczych;
- syntezę białek i węglowodanów;
- zwiększenie odporności na stres (Peng, 2021).

Niedobór potasu prowadzi do nekrozy brzegów liści, zwiększonej podatności na wyleganie i choroby oraz do obniżenia zawartości cukrów w roślinie (Peng, 2021).

Wapń

Zapotrzebowanie na wapń wynosi $40 - 60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Wapń jest niezbędny do:

- rozwoju i funkcjonowania ścian komórkowych;
- procesu kiełkowania pyłku;
- neutralizacji kwaśnych metabolitów;
- zwiększenia odporności na choroby (White, 2003).

Magnez

Magnez jako składnik chlorofilu jest niezbędny w procesie fotosyntezy oraz aktywuje wiele enzymów (Cakmak, 2010). Kukurydza do prawidłowego wzrostu i rozwoju potrzebuje 25 – 35 kg Mg·ha⁻¹.

Siarka

Zapotrzebowanie kukurydzy na siarkę wynosi 20 – 30 kg·ha⁻¹. Siarka jest składnikiem białek i wpływa na efektywność wykorzystania azotu (Scherer, 2001).

Mikroelementy

Najważniejsze mikroelementy dla kukurydzy i ich funkcje:

- Bor (B): pobierany w ilości 80 – 110 g·ha⁻¹ – wpływa na zapłodnienie i rozwój kolb;
- Cynk (Zn): pobierany w ilości 10 – 430 g·ha⁻¹ – jest aktywatorem enzymów, bierze udział w syntezie białek;
- Mangan (Mn): pobierany w ilości 10 – 930 g·ha⁻¹ – uczestniczy w fotosyntezie i metabolizmie azotu;
- Żelazo (Fe): pobierane w ilości 430 – 1040 g·ha⁻¹ – bierze udział w transporcie elektronów i syntezie chlorofilu;
- Miedź (Cu): pobierana w ilości 9 – 180 g·ha⁻¹ – uczestniczy w procesie oddechowym i syntezie ligniny (Martins, 2017).

Stosowanie makroelementów w uprawie kukurydzy

Optymalne dawki azotu dla kukurydzy kiszonkowej wynoszą 150 – 220 kg N·ha⁻¹ w zależności od poziomu plonowania i zasobności gleby. Badania wykazują, że ekonomicznie optymalna dawka azotu wynosi około 180 – 200 kg N·ha⁻¹ przy cenach nawozów na poziomie 4 – 5 zł za kg azotu (Kyveryga, 2004).

W uprawie kukurydzy nawożenie azotowe powinno być podzielone na 2 – 3 dawki:

1. Dawka przedsiewna: 40 – 60 kg N·ha⁻¹ – aplikowana przedsiewnie podczas przygotowania stanowiska glebowego;
2. Dawka pogłówna I w ilości 80 – 120 kg N·ha⁻¹ – aplikowana w fazie 4-6 liści;

3. Dawka pogłówna II w ilości 40 – 60 kg N·ha⁻¹ – aplikowana w fazie 8-10 liści (Fernández, 2009).

Podział dawek azotu pozwala między innymi na:

- lepsze wykorzystanie azotu przez kukurydzę;
- zmniejszenie strat tego składnika przez wymywanie;
- dostosowanie nawożenia azotowego do aktualnych potrzeb kukurydzy (Fernández, 2002).

W uprawie kukurydzy można zastosować następujące nawozy azotowe:

- Mocznik (46% N) – nawóz ten jest najczęściej stosowany, wymaga on szybkiego wymieszania z glebą;
- Saletra amonowa (34% N) wykazuje szybkie działanie, odpowiednia dla wczesnych dawek;
- Siarczan amonu (21% N) poza azotem dodatkowo dostarcza roślinom siarkę;
- Roztwory nawozowe (RSM) umożliwiają równomierne rozprowadzenie nawozu na powierzchni pola (Mengel, 2001).

Dawki fosforu zastosowane w nawożeniu kukurydzy powinny być dostosowane do zasobności gleby:

- na glebach bardzo ubogich: 100 – 120 kg P₂O₅ ·ha⁻¹
- na glebach ubogich: 80 – 100 kg P₂O₅ ·ha⁻¹;
- na glebach średnio zasobnych: 60 – 80 kg P₂O₅ ·ha⁻¹;
- na glebach zasobnych: 40 – 60 kg P₂O₅ ·ha⁻¹ (Johnston, 2018).

Fosfor najlepiej jest aplikować jesienią lub wczesną wiosną w formie superfosfatu lub fosforanu amonowego (Syers, 2008).

Dawki potasu w uprawie kukurydzy w zależności od zasobności gleby wynoszą:

- na glebach bardzo ubogich: 180 – 220 kg K₂O ·ha⁻¹;
- na glebach ubogich: 140 – 180 kg K₂O ·ha⁻¹;
- na glebach średnio zasobnych: 100 – 140 kg K₂O ·ha⁻¹;
- na glebach zasobnych: 60– 100 kg K₂O ·ha⁻¹ (Zörb, 2014).

Potas może być aplikowany jesienią lub wiosną w formie soli potasowych (chlorku potasu) lub siarczanu potasu (Pettigrew, 2008).

Nawożenie precyzyjne

Zastosowanie nawożenia precyzyjnego, uwzględniającego zmienność przestrzenną właściwości gleby, może prowadzić do zwiększenia efektywności

wykorzystania nawozów o 15 – 25%, redukcji dawek nawozów o 10 – 20%, poprawy równomierności plonowania oraz zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze (Robertson, 1994).

Monitoring stanu odżywienia

Regularne badanie zawartości składników pokarmowych w glebie oraz analizy liści pozwalają na optymalizację dawek nawozów, wczesne wykrycie niedoborów składników pokarmowych, dostosowanie nawożenia do aktualnych potrzeb rośliny oraz zwiększenie efektywności ekonomicznej nawożenia (Beegle, 2005).

Optymalne zawartości składników pokarmowych w liściach kukurydzy w fazie kwitnienia wynoszą:

- Azot: 2,8 – 3,5% s.m.;
- Fosfor: 0,25 – 0,40% s.m.;
- Potas: 1,8 – 2,5% s.m.;
- Wapń: 0,3 – 0,7% s.m.;
- Magnez: 0,15 – 0,30% s.m. (Mills, 1996).

4. Hipoteza i cel badań

Hipoteza badawcza zakłada, że opracowanie biodegradowalnej otoczki polimerowej dla nawozów azotowych (mocznika) oraz nawozów wieloskładnikowych (NPK) pozwoli na kontrolowane i spowolnione uwalnianie składników pokarmowych do gleby, zwiększając ich efektywne wykorzystanie przez rośliny i umożliwiając utrzymanie wysokiego plonu przy jednoczesnym ograniczeniu dawek nawozowych. Tego typu innowacyjne rozwiązanie może przyczynić się do znaczącej minimalizacji strat pierwiastków nawozowych do środowiska, w tym do ograniczenia emisji amoniaku i wypłukiwania azotanów do warstw wodonośnych, co stanowi istotny postulat w kontekście ochrony środowiska naturalnego.

Celem badań jest kompleksowe opracowanie oraz wdrożenie technologii biodegradowalnych otoczek dla nawozów typu N i NPK, obejmujące proces syntezy powłok, optymalizację metody nanoszenia na granulki nawozowe oraz szczegółową ocenę właściwości otoczkowanych nawozów zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych. Badania obejmują porównanie efektywności nawozów otoczkowanych i nieotoczkowanych pod kątem pobierania składników odżywczych, tempa wzrostu i rozwoju roślin, a także analizy ich wpływu na środowisko glebowe. Końcowym etapem badań jest opracowanie przemysłowego procesu produkcji nawozów otoczkowanych oraz wdrożenie wyników do praktyki rolniczej, ze zwróceniem uwagi na aspekty ekonomiczne i ekologiczne tej technologii, które mogą istotnie wpłynąć na zrównoważony rozwój współczesnego rolnictwa.

5. Materiał i metody

Skład otoczek biodegradowalnych

Biodegradowalne otoczki nawozowe zostały opracowane w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntez Chemicznych w Puławach. Do ich wytworzenia wykorzystano nierafinowany olej lniany lub olej konopny, pył węgla brunatnego pochodzący z Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów” o frakcji poniżej 500 mikrometrów oraz katalizator Brochi Dragon, który przyspiesza proces sieciowania powłok olejowych. Gotowe nawozy powlekane zawierały 10% mas. materiału stanowiącego powłokę.

Proces powlekania granuli

Proces powlekania prowadzono szarżowo w instalacji do otoczkowania należącej do Centrum Badawczego Nawozów Łukasiewicz-INS, w temperaturze otoczenia. Po aplikacji każdej warstwy granule poddawano wygrzewaniu w suszarce komorowej w temperaturze 80°C przez okres od 45 do 60 minut. Dodatek katalizatora do oleju umożliwiał skrócenie tego czasu średnio o około 20 minut. Na granule наносzono łącznie siedem warstw powłoki. Pierwsza z nich stanowiła warstwę przygotowawczą i polegała na pokryciu powierzchni cienką warstwą oleju lnianego w ilości odpowiadającej 1% masy nawozu. Następnie aplikowano pięć kolejnych warstw pośrednich, składających się z mieszaniny oleju lnianego lub konopnego oraz zmielonego węgla brunatnego, przy czym udział każdego ze składników również wynosił około 1% masy nawozu. Całość procesu zamykała końcowa warstwa oleju lnianego, pełniąca funkcję zabezpieczającą i uszczelniającą, której zadaniem było ograniczenie nadmiernej sorpcji wilgoci z otoczenia. Tak przygotowane nawozy powlekane umożliwiały porównanie efektywności nawozów wieloskładnikowych i mieszanek nawozów jednoskładnikowych, a także pozwalały na ocenę wpływu rodzaju otoczki oraz redukcji dawki azotu na efektywność nawożenia i dostępność składników pokarmowych dla roślin.

Struktura powłoki i liczba warstw

Na każdą granulkę nawozu naniesiono łącznie siedem kolejnych warstw otoczki. Pierwsza warstwa stanowiła etap przygotowawczy i polegała na aplikacji cienkiej warstwy oleju lnianego w ilości odpowiadającej 1% masy nawozu. Jej zadaniem było wyrównanie powierzchni i poprawa adhezji kolejnych warstw powłoki.

Kolejne pięć warstw, aplikowanych w etapach od drugiego do szóstego, było realizowanych z użyciem mieszaniny oleju lnianego lub oleju konopnego oraz pyłu węgla

brunatnego. Każdy ze składników наносzono w ilości odpowiadającej 1% masy nawozu, dzięki czemu uzyskiwano kompozyt olejowo-mineralny, pełniący rolę buforującą i stopniowo tworzący szczelną barierę ograniczającą tempo uwalniania składników pokarmowych. Kombinacja oleju roślinnego i zmielonego węgla zapewniała zarówno elastyczność, jak i mechaniczne wzmocnienie powierzchni granuli, redukując ryzyko uszkodzeń podczas magazynowania, transportu oraz wysiewu.

Ostatnia, siódma warstwa powłoki, składająca się wyłącznie z oleju lnianego w ilości 1% masy nawozu, stanowiła finalne uszczelnienie. Jej funkcją było zabezpieczenie powierzchni granuli przed nadmierną sorpcją wilgoci oraz domknięcie powłoki barierowej, co dodatkowo stabilizowało i utrwalało całą strukturę otoczki.

Efekt końcowy procesu

Tak zaprojektowana sekwencja nakładania warstw umożliwiała uzyskanie powłok trójskładnikowych o łącznej zawartości od 10 do 14% w stosunku do masy nawozu, charakteryzujących się dobrą spójnością, elastycznością i zwiększoną odpornością mechaniczną. Uzyskane granule miały ograniczoną zdolność do szybkiej wymiany wilgoci z otoczeniem oraz spowolnione uwalnianie makroskładników, co stanowiło klucz do dalszej oceny ich efektywności w warunkach polowych.

Metodyka badań otoczek

Wytworzone nawozy powlekane oceniano pod kątem uwalniania makroskładników po 24 h oraz po 28 dniach od rozpoczęcia badań. Próbkę nawozów ($10 \pm 0,1$ g) umieszczano w kolbach z 500 ml wody (zgodnie z ISO 3696). Kolby wytrząsano w łaźni wodnej, w temp. 25°C przez 24 godziny. Po tym czasie pobierano próbki do analizy, a nierozpuszczony nawóz zalewano świeżą wodą i pozostawiano na kolejne 28 dni w analogicznych warunkach. Analizy prowadzono zgodnie z obowiązującą normą dla oznaczania uwalniania składników z nawozów o spowolnionym uwalnianiu.

Charakterystyka badań polowych nawozów i warunków agrotechnicznych

Badania polowe przeprowadzono w Gospodarstwie Doświadczalnym Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, w miejscowości Czesławice (51°18'24"N, 22°16'04"E). Eksperyment prowadzono w trzech kolejnych sezonach wegetacyjnych: 2022, 2023 oraz 2024, co pozwoliło na ocenę stabilności badanych parametrów w zróżnicowanych warunkach pogodowych. Teren doświadczenia odznaczał się glebą odczynie lekko kwaśnym (pH 6,1). Gleba charakteryzowała się bardzo wysoką zasobnością w fosfor, natomiast odnotowano średnią zasobność w potas, magnez i siarkę. Takie warunki stwarzały korzystne środowisko do wzrostu i rozwoju kukurydzy, choć

wymagały odpowiedniego uwzględnienia w interpretacji uzyskanych wyników. Zgodnie z klasyfikacją granulometryczną według polskiej normy PN-R-04033:1998 oraz przyjętymi kategoriami agronomicznymi, gleba ta została zakwalifikowana do gleb pyłowych (gliniasto-pyłowych).

Udział poszczególnych frakcji granulometrycznych kształtował się następująco:

- frakcja piasku (2,0–0,05 mm) – 20,76%,
 - 2,0–1,0 mm – <0,01%,
 - 1,0–0,10 mm – 1,31%,
 - 0,10–0,05 mm – 19,44%,
- frakcja pyłu (0,05–0,002 mm) – 79,25%,
 - 0,05–0,02 mm – 40,53%,
 - 0,02–0,002 mm – 31,74%,
- frakcja iłu (<0,002 mm) – 6,98%.

Gleba charakteryzowała się parametrami podanymi w Tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka chemiczna gleby na stanowisku doświadczalnym

Parametr	Wartość	Opis	Jednostka
pH	6,1	lekko kwaśny	-
P ₂ O ₅	24,2	bardzo wysoka	mg/100g gleby
K ₂ O	16,2	średnia	mg/100g gleby
Mg	5,9	średnia	mg/100g gleby
S ogólna	0,027	średnia	% p.s.m.
N-NO ₃ (0–30 cm)	22,39	bardzo wysoka	mg·kg ⁻¹ s.m. gleby
N-NH ₄ (0–30 cm)	<0,83	bardzo wysoka	mg·kg ⁻¹ s.m. gleby
N min (0–30 cm)	96,30	bardzo wysoka	kg·ha ⁻¹
N min (0–60 cm)	135,70	bardzo wysoka	kg·ha ⁻¹

Materiał roślinny i warunki uprawy

Rośliną testową była kukurydza (*Zea mays* L.) uprawiana z przeznaczeniem na kiszonkę. W doświadczeniu zastosowano odmianę Pioneer P8240 (typ dent, grupa średnio wczesna). Odmiana ta cechuje się wysokim potencjałem plonowania, dużą zawartością łatwo przyswajalnej skrobi, bardzo istotnej w żywieniu bydła mlecznego, a także wyraźnym efektem stay-green, oznaczającym dłuższe utrzymanie zielonych liści

po kwitnieniu, co korzystnie wpływa na wartość kiszonki. Dodatkowym atutem P8240 jest dobry wigor początkowy, pozwalający na udane wschody i rozwój młodych roślin nawet przy okresowych spadkach temperatury. Odmiana ta dość dobrze znosi warunki chłodniejsze, wymaga jednak stanowisk o odpowiednim zaopatrzeniu w wodę, osiągając najlepsze wyniki plonowania na glebach średnich i lepszych. Producent zaleca obsadę 80 – 85 tys. roślin/ha na glebach słabszych oraz 85 – 90 tys/ha w warunkach lepszych. W niniejszym doświadczeniu materiał siewny został przygotowany poprzez zastosowanie pakietu zapraw nasiennych LumiGEN™ Premium, zapewniających ochronę przed chorobami i poprawiających wigor kiełkowania.

Układ i prowadzenie doświadczenia

Pole doświadczalne zostało podzielone na 39 poletek o powierzchni 25 m² każde (8 rzędów o rozstawie 75 cm), co odpowiadało 3 powtórzeniom w układzie losowanych bloków pełnych przy uwzględnieniu 13 wariantów doświadczenia. Siew kukurydzy przeprowadzano w optymalnych terminach agrotechnicznych, różniących się w zależności od przebiegu wiosny – 13 maja 2022 roku, 9 maja 2023 roku oraz nieco wcześniej w roku 2024, tj. 19 kwietnia, ze względu na szybciej nagrzewającą się glebę i korzystne warunki wilgotnościowe. Norma wysiewu została ustalona na poziomie 80 tys. nasion/ha. Ochronę plantacji przed chwastami realizowano metodą chemiczną, poprzez zastosowanie herbicydu Lumax 537,5 SE, dobraneo ze względu na szerokie spektrum zwalczanych gatunków chwastów.

Pomiary i zbiór materiału

Zbiór kukurydzy wykonywano w fazie dojrzałości mleczno-woskowej ziarniaków, w momencie, gdy zawartość suchej masy w całych roślinach wynosiła 30–35%. Do oceny plonowania i parametrów morfologicznych wykorzystano rośliny pochodzące z dwóch środkowych rzędów każdego poletka, przy zachowaniu reprezentatywnej powierzchni próbnej o wielkości 2 m². Analizy obejmowały następujące pomiary:

- masę świeżej biomasy nadziemnej;
- masę kolb;
- wysokość roślin (od powierzchni gleby do najwyższego liścia);
- liczbę kolb przypadających na jedną roślinę;
- liczbę rzędów ziaren na kolbie.

Uzyskane dane pozwoliły na ocenę plonowania kukurydzy oraz opis różnic między testowanymi wariantami w zależności od roku badań i warunków siedliskowych.

Analiza chemiczna kukurydzy

- Po zbiorze kukurydzy materiał roślinny wysuszono i zmielono.
- Oznaczenie azotu ogółem przeprowadzono metodą Kjeldahla: materiał roślinny poddano mineralizacji w stężonym kwasie siarkowym(VI) (H_2SO_4) z dodatkiem 30% H_2O_2 , co umożliwiło przekształcenie azotu organicznego w formę amonową. Następnie zawartość azotu ogółem określono poprzez destylację i miareczkowanie uzyskanej próbki.
- Fosfor oznaczano metodą molibdenowo-wanadową po wcześniejszej mineralizacji próbki w stężonym kwasie siarkowym(VI) (H_2SO_4) z dodatkiem 30% H_2O_2 . Fosfor został wyodrębniony i określony spektrofotometrycznie poprzez reakcję z odczynnikiem molibdenowo-wanadowym.
- Siarkę siarczanową(VI) oznaczano metodą nefelometryczną: materiał roślinny ekstrahowano 2% roztworem kwasu octowego (CH_3COOH) z dodatkiem węgla aktywnego, a następnie uzyskany ekstrakt poddano analizie nefelometrycznej.
- Potas i magnez oraz mikroelementy – żelazo, cynk, miedź i mangan oznaczano po wcześniejszej mineralizacji próbki w stężonym kwasie siarkowym(VI) (H_2SO_4) z dodatkiem 30% H_2O_2 z zastosowaniem atomowej spektrometrii absorpcyjnej (ASA).

Każdy z etapów wymagał odpowiedniego przygotowania prób roślinnych oraz oznaczenia pierwiastka wybraną metodą instrumentalną lub klasyczną.

Analiza gleby

Badania gleby wg metod akredytowanych:

W ramach prac laboratoryjnych dokonano oznaczeń fizykochemicznych i chemicznych właściwości gleby przed założeniem doświadczenia polowego oraz po zbiorze rośliny testowej. Analizy te wykonano z zastosowaniem metod powszechnie używanych w laboratoriach chemiczno-rolniczych.

- Skład granulometryczny gleby metodą dyfrakcji laserowej;
- Oznaczenie pH gleby metodą potencjometryczną w chlorku potasu (wg normy PN-ISO 10390:1997);

- Oznaczanie azotu ogólnego metodą Kjeldahla;
- Oznaczanie azotu azotanowego (N-NO_3) metodą fotokolorymetryczną z zastosowaniem odczynnika Nesslera;
- Oznaczanie azotu amonowego (N-NH_4) metodą fotokolorymetryczną z zastosowaniem odczynnika Nesslera;
- Oznaczenie zawartości fosforu przyswajalnego (P_2O_5) metodą spektrofotometryczną (norma PN-R-04023:1996);
- Oznaczenie zawartości potasu przyswajalnego (K_2O) metodą Egnera-Riehma (norma PN-R-04022:1996+Az1:2002);
- Oznaczenie zawartości magnezu przyswajalnego metodą Schachtschabela (norma PN-R 4020:1994+Az1:2004).

Charakterystyka nawozów

W doświadczeniu wykorzystano dwa typy nawozów mineralnych różniących się składem oraz formą przygotowania.

Pierwszym z nich była Polifoska Start, wieloskładnikowy nawóz NPK zawierający 12% azotu, 11% pięciotlenku fosforu, 18% tlenku potasu, 2,7% tlenku magnezu oraz 29% trójtlenku siarki. Nawozy te stosowano zarówno w wersji niepowlekannej, jak i w postaci granul otoczonych biodegradowalnymi powłokami opartymi na olejach roślinnych i pyłe węgla brunatnego. Wytworzono dwa warianty powłok: pierwszy zawierał olej lniany i pył węgla brunatnego, a drugi olej konopny i pył węgla brunatnego.

Drugim typem nawożenia była mieszanka nawozów jednoskładnikowych, składająca się z mocznika, siarczanu potasu oraz superfosfatu. Została ona zestawiona w takich proporcjach, aby odpowiadały składowi Polifoski Start. Nawozy te również stosowano zarówno bez powłok, jak i w wersjach powlekanych analogicznych do wariantów zastosowanych w przypadku nawozu wieloskładnikowego.

Poziomy nawożenia

Dawkowanie przeprowadzono na dwóch poziomach – w dawce pełnej wynoszącej $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ oraz w dawce obniżonej do $135 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, co odpowiada redukcji o 25% w stosunku do wariantu podstawowego.

Tabela 2. Zestawienie dawek nawozów zastosowanych w doświadczeniu dla dwóch poziomów nawożenia azotem (180 i 135 kg N·ha⁻¹)

Typ nawozu	Kontrola (kg)	Otoczka 1 (kg)	Otoczka 2 (kg)	Otoczka 1 - 25% N (kg)	Otoczka 2 - 25% N (kg)
Mocznik	0,98	1,09	1,09	0,82	0,82
K ₂ SO ₄	1,40	1,40	1,40	1,05	1,05
P ₂ O ₅	1,03	1,03	1,03	0,77	0,77
Polifoska start	3,75	4,17	4,17	3,13	3,13

Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej przy wykorzystaniu programu Statistica 13, stosując analizę wariancji (ANOVA) dla układów czynnikowych, test Tukeya (HSD) dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ w każdym roku badań osobno. Sprawdzano jednorodność wariancji (test Levene'a) oraz normalność rozkładu (test Shapiro–Wilka). Badano wpływ typu nawozu (NPK vs. mocznik), rodzaju otoczki (bez otoczki, lniana, konopna), dawki azotu (135 vs. 180 kg N·ha⁻¹). Wpływ poszczególnych czynników oraz ich interakcji oceniano na podstawie współczynnika η^2_p . Wyniki porównywano także z kontrolą bez nawożenia.

6. Wyniki badań

6.1. Wyniki przedstawione w publikacji P1

Charakterystyka badań eksperymentalnych

Badanie dotyczyło opracowania technologii produkcji nawozów o kontrolowanym uwalnianiu składników (CRF) z wykorzystaniem biodegradowalnych powłok na bazie oleju lnianego. Eksperymenty przeprowadzono na dwóch komercyjnych nawozach wieloskładnikowych NPK: Polifoska Start (12-11-18+(Mg)+2,7(S)+29) oraz Polifoska 6 (6-20-30+(S)+7), które pokryto siedmiowarstwową otoczką w procesie natryskiwania w bębnie granulacyjnym.

Metodologia powlekania

Proces powlekania przeprowadzono w temperaturze otoczenia metodą szarżową, testując trzy różne warianty otoczek różniące się zawartością katalizatora metaloorganicznego (Borchi Dragon) w oleju lnianym:

- **Otoczka 1:** brak katalizatora w oleju;
- **Otoczka 2:** 0,5% mas. katalizatora w oleju;
- **Otoczka 3:** 1% mas. katalizatora w oleju.

Każda próbka została pokryta łącznie siedmioma warstwami, z których pierwsza warstwa składała się wyłącznie z oleju (1% mas. nawozu NPK), warstwy 2 – 6 zawierały olej i węgiel brunatny (po 1% mas.), a warstwę siódmą stanowił ponownie sam olej. Proces utwardzania przeprowadzono wygrzewając granulat w temperaturze 80°C przez 45 – 60 minut, przy czym dodatek katalizatora skracał czas utwardzania o około 20 minut.

Wyniki uwalniania składników pokarmowych

Uwalnianie azotu

Dla wszystkich testowanych próbek poziom uwalniania azotu w ciągu pierwszej doby wynosił około 40%, co było zbyt wysokie w odniesieniu do kryteriów zawartych w normie PN-EN 13266/2003, która zakłada maksimum 15% uwolnienia w ciągu 24 godzin dla nawozów SRF/CRF. Polifoska Start, charakteryzująca się dwukrotnie wyższą zawartością azotu w porównaniu z Polifoską 6, uwalniała więcej azotu (o 5 – 10%) w ciągu pierwszej doby.

Uwalnianie fosforu i potasu

Pozostałe makroskładniki nawozu – potas i fosfor – uwalniały się na poziomie nieprzekraczającym 15% w ciągu pierwszej doby, spełniając tym samym wymagania normy. W przypadku Polifoski 6, która zawierała niemal dwukrotnie więcej fosforu i potasu, poziom uwalniania tych składników był wyższy niż dla Polifoski Start.

Długoterminowe uwalnianie

Z wszystkich nawozów poddanych analizie żaden nie przekroczył 75% uwolnionych składników po 28 dniach, co również mieści się w wymaganiach normy dla nawozów o spowolnionym uwalnianiu.

Wpływ rodzaju otoczki na efektywność

Analiza wyników wskazuje, że efektywność uwalniania składników pokarmowych była ściśle związana z charakterystyką otoczki i rodzajem nawozów. Szczególnie obiecujące okazały się otoczki 2 i 3 (z dodatkiem katalizatora), biorąc pod uwagę uzyskane wyniki i obserwacje w procesie nanoszenia oraz utwardzania. Dodatek katalizatora w przypadku otoczek 2 i 3, zarówno dla Polifoski Start, jak i Polifoski 6, przyspieszył proces utwardzania o około 20 minut w porównaniu z otoczką bez katalizatora.

6.2. Wyniki przedstawione w publikacji P2

Charakterystyka badań eksperymentalnych

Niniejsze badanie koncentrowało się na opracowaniu technologii wytwarzania nawozów granulowanych wzbogaconych mikrobiologicznie metodą otoczkowania. Pomimo rozszerzenia badań o wprowadzanie mikroorganizmów, kluczowym aspektem tej pracy jest technologia nanoszenia otoczki na granule nawozów, w tym przypadku PEG (polietylenoglikol). Metoda ta jest uniwersalna do nanoszenia materiałów otoczkujących (powłok), w tym stosowanych w przeprowadzonym doświadczeniu. Dlatego szczegółowa analiza parametrów technologicznych jest niezwykle istotna w przypadku tego projektu badawczego. Eksperymenty prowadzono na dwóch komercyjnych nawozach mineralnych: **Polifoska Krzem®** (6-12-34+10S) oraz **Super Fos Dar® 40** (40% P₂O₅), które poddano procesowi powlekania zewnętrzną warstwą zawierającą mikroorganizmy.

Metodologia technologiczna

Proces produkcyjny

Opracowana technologia obejmowała następujące etapy:

Nagrzewanie nawozu: Granulat podgrzewano strumieniem gorącego powietrza w obracającym się bębnie granulacyjnym do temperatury 70 – 80°C.

Nakładanie lepiszcza: Dodawano sproszkowany glikol polietylenowy PEG 4000, który w kontakcie z gorącym nawozem ulegał stopieniu, pokrywając nawóz cienkim filmem.

Wprowadzanie mikroorganizmów: Dozowano mieszaninę bakterii składającą się z konsorcjum liofilizowanych szczepów:

- *Bacillus* sp. Pszenica 4/4;
- *Paenibacillus polymyxa* CHT114AB;
- *Bacillus amyloliquefaciens* AF75BB.

Stabilizacja: Wprowadzano dodatek gliceryny pod koniec procesu, który ułatwiał związanie reszty bakterii oraz zmniejszał pylenie.

Skład produktu końcowego

Według bilansu masowego opracowanego produktu:

- Granulat surowego nawozu: 95,0% mas.;
- Lepiszcz (PEG): 4,0% mas.;
- Biokomponent: 1,0% mas.

Wyniki obliczeń procesowych

Parametry nagrzewania

Na podstawie obliczeń metodą elementów skończonych (MES) ustalono optymalne parametry procesu nagrzewania:

- Optymalna liczba przedziałów w sekcji nagrzewacza: 6;
- Optymalna grubość przedziałów na granulat: 60 mm;
- Potrzebna moc grzewcza sekcji: 12,0 kW;
- Czas fazy grzania: 35 minut 28 sekund;
- Czas wyrównywania temperatury: 17 minut 32 sekundy.

Parametry chłodzenia

Obliczenia wykazały, że wychładzanie szarży granulatu z 64°C do 40°C jest możliwe w czasie do 18 minut przy zastosowaniu opracowanego układu technicznego. System chłodzenia zaprojektowano w dwóch trybach pracy:

- Tryb zamknięty: z cyrkulacją powietrza między centralą chłodniczą a bębniem chłodzącym;

- Tryb otwarty: z otwartym przepływem powietrza atmosferycznego.

Efektywność energetyczna

Analiza różnych wariantów chłodzenia wykazała, że wykorzystanie powietrza atmosferycznego o otwartym przepływie jest bardziej opłacalne ekonomicznie, pod warunkiem że wilgotność powietrza nie przekracza 86%, a temperatura nie jest wyższa niż 16°C.

Założenia technologiczno-aparaturowe

Instalacja produkcyjna

Opracowano kompletny schemat instalacji składającej się z następujących elementów:

- Nagrzewacz granulatu (NG) – z matami grzewczymi silikonowymi;
- Mieszalnik lepiszcza i biokomponentu (MLB) – pojemność robocza 220 dm³;
- Bęben otoczkowania (BO) – dla głównego procesu powlekania;
- Bęben chłodzenia (BCh) – z systemem cyrkulacji powietrza chłodzącego;
- Centrala chłodnicza powietrza (CCh) – współpracująca z agregatem wody lodowej.

Bilans masowy procesu

Dla wydajności instalacji 500 kg/h opracowano szczegółowy bilans masowy, uwzględniający:

- Liczbę szarż na godzinę: 2,0;
- Masę szarży produktu: 250,0 kg;
- Założony uzysk materiału: 95,0%;
- Czas załadunku biokomponentu: 3,0 min;
- Czas prowadzenia procesu otoczkowania: 10,0 min.

6.3. Wyniki przedstawione w publikacji P3

Charakterystyka eksperymentu polowego

Prezentowane w publikacji badania oparto o trzyletnie (2022 – 2024) doświadczenie polowe zlokalizowane w Gospodarstwie Doświadczalnym w Czesławicach, należącym do Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Doświadczenie polowe przeprowadzono metodą losowanych bloków w trzech powtórzeniach, łącznie na 39 poletkach doświadczalnych (13 obiektów doświadczalnych w trzech powtórzeniach), każde o powierzchni 25 m². Rośliną doświadczalną była kukurydza (*Zea mays* L.) uprawiana na kiszonkę, odmiany Pioneer P8240 (średnio wczesny mieszaniec zębaty).

Metodologia badawcza

Schemat doświadczenia

Eksperyment obejmował trzy czynniki doświadczalne:

- Rodzaj nawozu: dwa poziomy (mocznik, nawóz wieloskładnikowy NPK);
- Rodzaj otoczki biodegradowalnej: dwa poziomy (na bazie oleju lnianego lub konopnego z lignitem);
- Dawka azotu: dwa poziomy (135 i $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Nawozy użyte w doświadczeniu

- Polifoska Start: nawóz wieloskładnikowy o składzie NPK(Mg, S) 12-11-18(+2,7 MgO +29 SO₃);
- Mieszanina nawozów jednoskładnikowych: mocznik + siarczan potasu + superfosfat o składzie chemicznym odpowiadającym Polifosce Start

Nawozy powlekane biodegradowalną otoczką wyprodukowano w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Nowych Syntezy Chemicznych w Puławach.

Wyniki plonowania kukurydzy

Pierwszy rok badań (2022)

W pierwszym roku badań stwierdzono najsilniejszy wpływ czynników doświadczalnych na plon kukurydzy:

- Najwyższe rośliny (średnio $307 - 310 \text{ cm}$) i najwyższy plon ($107,33 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) uzyskano przy stosowaniu nawozów złożonych lub mocznika z otoczkami w porównaniu z seriami, w których aplikowano nawozy bez otoczek;
- Różnice w plonie wynosiły do $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na korzyść nawozów powlekanych;
- Wpływ rodzaju nawozu: η^2p do $17,83\%$;
- Wpływ rodzaju otoczki: η^2p do $63,15\%$;
- Wpływ interakcji czynników: η^2p do $11,92\%$.

Drugi i trzeci rok badań

W kolejnych dwóch latach doświadczenia obserwowano słabszy wpływ czynników doświadczalnych na plon i parametry biometryczne kukurydzy. Istotnie wyższy plon kukurydzy w porównaniu z nawozami niepowlekаныmi odnotowano jedynie dla nawozu złożonego NPK.

Wyniki średnie z trzech lat

Średnio najwyższy plon kukurydzy uzyskano w serii, w której zastosowano powlekany nawóz złożony NPK ($98,80 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), a najniższy w serii kontrolnej bez nawożenia ($66,90 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Analiza statystyczna parametrów biometrycznych

Wysokość roślin

- Średnie wartości wysokości roślin (282 – 287 cm) mieściły się w zakresie typowym dla nowoczesnych odmian kukurydzy;
- Najistotniejsze różnice obserwowano w pierwszym roku trwania eksperymentu, gdzie zarówno rodzaj nawozu, jak i rodzaj otoczki oraz ich wzajemna interakcja wpływały na wysokość roślin kukurydzy;
- Szczególnie korzystny efekt uzyskano przy stosowaniu mocznika i NPK w połączeniu z otoczkami typu 1 i 2.

Liczba kolb na roślinie

Nie stwierdzono wpływu badanych czynników na liczbę kolb kukurydzy ($\eta^2 p < 2,27\%$). Średnia liczba kolb na roślinie pozostawała stabilna (około 0,52 – 0,53) niezależnie od stosowanych nawozów, co jest charakterystyczne dla nowoczesnych odmian kukurydzy o wysokim potencjale plonowania.

Wpływ warunków meteorologicznych

Warunki hydrotermiczne

Podczas trzyletniego okresu badań warunki meteorologiczne znacznie się różniły:

- Rok III charakteryzował się najkorzystniejszymi temperaturami w okresie wegetacji ($21,7^\circ\text{C}$ w lipcu i $19,5^\circ\text{C}$ w czerwcu);
- Wartości wskaźnika hydrotermicznego Sielanianowa (HTC) wykazały znaczną zmienność między latami, od bardzo suchych warunków ($\text{HTC} < 0,5$) do bardzo wilgotnych ($\text{HTC} > 3,0$);
- Warunki suszy występujące w maju trzeciego roku badań (14,9 mm opadów) mogły ograniczyć biodegradację otoczek;
- Nadmierne opady w sierpniu trzeciego roku eksperymentu polowego (134,2 mm) mogły z kolei przyspieszyć degradację otoczek.

Mechanizmy działania

Skuteczność nawozów powlekanych wynika z kilku mechanizmów działania:

1. Kontrolowane uwalnianie składników pokarmowych pozwala na lepsze dostosowanie dostaw azotu do potrzeb roślin;
2. Redukcja strat azotu z powodu wymywania i ulatniania do atmosfery zwiększa efektywność jego wykorzystania;
3. Stopniowa degradacja otoczek biodegradowalnych w glebie umożliwia naturalne dostosowanie uwalniania azotu do aktywności biologicznej gleby.

7. Wyniki niepublikowanych badań i dyskusja

7.1. Zawartość makroelementów w kukurydzy

7.1.1. Zawartość azotu ogółem w kukurydzy

Przedstawiona tabela zawiera wyniki trójczynnika eksperymentu polowego prowadzonego przez trzy lata, badającego wpływ rodzaju nawozu azotowego, rodzaju otoczki nawozu oraz dawki azotu na zawartość składników pokarmowych w roślinie. W badaniach zastosowano test Tukeya (HSD) dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ w celu wyznaczenia grup jednorodnych. Eksperyment obejmował 36 obiektów doświadczalnych z trzema głównymi czynnikami: czynnik A (rodzaj nawozu) obejmujący warianty bez nawożenia i nawożenie mocznikiem oraz nawozem wieloskładnikowym NPK, czynnik B (rodzaj otoczki) z trzema poziomami oznaczonymi jako 0 (brak otoczki), 1 (olej lniany) i 2 (olej konopny) oraz czynnik C (dawka azotu) z poziomami 135 i 180 kg N·ha⁻¹

Tabela 3. Zawartość azotu ogółem w roślinie (g · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N·ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	11,4a	11,3a	11,7a	11,5A	11,9a	10,4a	12,0a	11,4A	11,1a
	135	11,3a	10,0a	11,4a	10,9A	11,3a	10,4a	10,7a	10,8A	A
	śr.	11,4A	10,7A	11,5A		11,6A	10,4A	11,4A		A
	śr.	11,2A				11,1A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	12,7a	11,0a	10,5a	11,4A	11,9a	11,1a	10,0a	11,0A	10,5a
	135	11,8a	11,0a	13,2a	12,0A	10,3a	11,4a	9,5a	10,4A	A
	śr.	12,2A	11,0A	11,9A		11,1A	11,3A	9,8A		A
	śr.	11,7A				10,7A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	11,5a	11,4a	11,9a	11,6A	11,7a	12,3a	12,6a	12,2A	10,1a
	135	11,8a	11,9a	12,1a	11,9A	12,2a	12,0a	12,1a	12,1A	A
	śr.	11,6A	11,7A	12,0A		12,0A	12,2A	12,3A		A
	śr.	11,8A				12,2A				A

Rok	Dawka N, kg N·ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	11,9a	11,3a	11,3a	11,5A	11,9a	11,3a	11,5a	11,6A	10,5a
	135	11,6a	11,0a	12,3a	11,6A	11,3a	11,3a	10,8a	11,1A	A
	śr.	11,7A	11,1A	11,8A		11,6A	11,3A	11,1A		A
	śr.	11,5A				11,3A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			

Zawartość azotu ogółem w roślinie wahała się od 9,5 do 13,2 g·kg⁻¹ przy średniej wartości 11,4 g·kg⁻¹ i odchyleniu standardowym 0,82 g·kg⁻¹ (Tabela 3). Współczynnik zmienności wynosił 7,2%, co wskazuje na umiarkowaną zmienność wyników w całym eksperymencie. Analiza wariancji wykazała, że wszystkie badane czynniki oraz ich interakcje okazały się statystycznie nieistotne przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Czynniki A (rodzaj nawozu) nie wykazał istotnych różnic między nawożeniem mocznikiem a brakiem nawożenia. Podobnie czynnik B (rodzaj otoczki) nie różnicował istotnie zawartości azotu ogółem między trzema badanymi typami otoczek. Czynniki C (dawka azotu) również nie spowodował istotnych różnic w zawartości azotu ogółem między dawkami 135 i 180 kg N·ha⁻¹. Wszystkie interakcje dwu- i trójczynnikiowe (AxB, AxC, BxC, AxBxC) również okazały się nieistotne statystycznie.

Średnie zawartości azotu ogółem według poszczególnych czynników doświadczalnych wynosiły: dla rodzaju nawozu -mocznik 11,5 g·kg⁻¹ przy dawce nawozu 180 kg N·ha⁻¹, 11,6 g·kg⁻¹ przy dawce nawozu 135 kg N·ha⁻¹, nawóz wieloskładnikowy 11,6 g·kg⁻¹, dla dawki azotu 180 kg N·ha⁻¹ i 11,1 g·kg⁻¹ dla dawki azotu 135 kg N·ha⁻¹, natomiast dla rodzaju otoczki wartości wynosiły odpowiednio: otoczka 0 – 11,7 g·kg⁻¹, otoczka 1 – 11,2 g·kg⁻¹, otoczka 2 – 11,5 g·kg⁻¹, co dało zakres zmienności 0,5 g·kg⁻¹.

Analiza według lat badań ujawniła większą zmienność niż czynniki eksperymentalne. W roku I średnia zawartość azotu ogółem wynosiła 11,15 g·kg⁻¹ przy współczynniku zmienności 5,7%. Rok II charakteryzował się średnią 11,20 g·kg⁻¹ i największą zmiennością (CV = 9,6%). Rok III wykazał najwyższą średnią zawartość azotu 11,96 g·kg⁻¹ przy najmniejszej zmienności (CV = 2,8%). Różnica między latami wyniosła 0,81 g·kg⁻¹, co było znacznie większe niż różnice między czynnikami eksperymentalnymi.

Oznaczenia literowe w tabeli potwierdzają wyniki analizy statystycznej. Wszystkie średnie oznaczone literą "A" oraz poszczególne wartości oznaczone małą literą "a" wskazują, że według testu Tukeya nie ma istotnych różnic statystycznych między żadnymi porównywanymi grupami. Ta jednorodność statystyczna potwierdza słabszą efektywność badanych zabiegów agrotechnicznych w odniesieniu do zmienności w latach badań.

Analizując wpływ rodzaju nawozu (czynnik A) na zawartość azotu ogółem w kukurydzy należy stwierdzić, że wyższą średnią dla lat badań zawartość tego makroskładnika odnotowano dla mocznika ($11,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). W przeprowadzonym eksperymencie średnie dla lat badań nieco wyższe zawartości azotu ogółem przy wyższej dawce azotu odnotowano w obiektach nawożonych nawozem wieloskładnikowym ($11,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w porównaniu do serii nawożonych mocznikiem ($11,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Z kolei przy niższej dawce azotu wyższe zawartości analizowanego makroskładnika stwierdzono w kukurydzy z obiektów nawożonych mocznikiem ($11,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Analizując wpływ otoczki na zawartość azotu w kukurydzy należy stwierdzić, że przy aplikacji mocznika najwyższą średnią dla lat badań koncentrację azotu ogółem stwierdzono przy aplikacji nawozu z otoczką 2 ($11,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), zaś w przypadku nawozu wieloskładnikowego bez otoczki ($11,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Z kolei biorąc pod uwagę dawkę azotu przy aplikacji mocznika nieco wyższe średnie zawartości azotu ogółem ($11,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) odnotowano przy niższej dawce tego makroskładnika, zaś przy aplikacji nawozu wieloskładnikowego wyższe zawartości stwierdzono przy dawce wyższej ($11,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Wyniki badania prowadzą do kilku istotnych wniosków. Po pierwsze, żaden z badanych czynników – ani rodzaj nawozu, ani dawka azotu, ani rodzaj otoczki – nie wpłynął istotnie na zawartość azotu ogółem w roślinie testowej, co sugeruje brak efektywności zastosowanych zabiegów w danych warunkach eksperymentu. Po drugie, dominujący wpływ miały warunki środowiskowe, gdyż różnice między latami badań były większe niż różnice między czynnikami eksperymentalnymi, co wskazuje na silny wpływ warunków pogodowych i innych czynników zewnętrznych. Po trzecie, stabilność wyników we wszystkich kombinacjach czynników może wskazywać na odpowiednią naturalną zawartość azotu w glebie, nieadekwatne dawki nawozu do potrzeb rośliny lub wpływ innych czynników nieuwzględnionych w eksperymencie. Z praktycznego punktu widzenia, w danych warunkach eksperymentalnych zwiększanie dawki azotu z 135 do $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie jest uzasadnione.

7.1.2. Zawartość fosforu w kukurydzy

Tabela 4 zawiera wyniki trójczynnikowego trzyletniego eksperymentu polowego oceniającego wpływ rodzaju nawozu azotowego, rodzaju otoczki nawozu oraz dawki azotu na zawartość fosforu w roślinie.

Tabela 4. Zawartość fosforu (P) w roślinie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N · ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	2,10a	2,37a	2,39a	2,29A	2,25a	2,20a	2,29a	2,25A	2,23a
	135	2,72a	2,38a	2,39a	2,25A	2,24a	2,31a	2,30a	2,28A	A
	śr.	2,41A	2,38A	2,39A		2,24A	2,26A	2,29A		A
	śr.	2,39A				2,26A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
II	180	2,09a	2,36a	2,42a	2,29A	2,27a	2,21a	2,28a	2,25A	2,23a
	135	2,74a	2,38a	2,42a	2,51A	2,27a	2,32a	2,31a	2,30A	A
	śr.	2,42A	2,37A	2,42A		2,27A	2,26A	2,30A		A
	śr.	2,40A				2,28A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	2,63a	2,70a	2,44a	2,59A	2,25a	2,69a	2,99a	2,65A	2,63a
	135	2,50a	2,90a	2,84a	2,75A	2,50a	2,89a	2,93a	2,77A	A
	śr.	2,56A	2,80A	2,64A		2,38A	2,79A	2,96A		A
	śr.	2,67A				2,71A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
Śr.	180	2,27a	2,48a	2,42a	2,39A	2,26a	2,37a	2,52a	2,38A	2,36a
	135	2,65a	2,55a	2,55a	2,58A	2,33a	2,51a	2,51a	2,45A	A
	śr.	2,46A	2,52A	2,48A		2,30A	2,44A	2,52A		A
	śr.	2,49A				2,42A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	

Zawartość fosforu w roślinie wahała się od 2,09 do 2,99 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy średniej zawartości 2,45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i odchyleniu standardowym 0,25 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Tabela 4). Współczynnik zmienności wynosił 10,0%, co wskazuje na wyższą zmienność wyników w porównaniu z azotem ogółem (7,2%). Zakres zawartości fosforu był znacznie węższy niż azotu, ale

względna zmienność okazała się większa, co może wskazywać na większą wrażliwość zawartości fosforu na warunki środowiskowe i czynniki eksperymentalne.

Analiza wariancji wykazała, że podobnie jak w przypadku azotu ogółem, wszystkie badane czynniki oraz ich interakcje okazały się statystycznie nieistotne przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Czynniki A (rodzaj nawozu) nie wykazał istotnych różnic między nawożeniem mocznikiem a nawozem wieloskładnikowym, przy czym średnie wartości wynosiły odpowiednio $2,49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla mocznika i $2,42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla nawozu wieloskładnikowego, co dało różnicę zaledwie $0,07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Czynniki B (rodzaj otoczki) również nie różnicował istotnie zawartości fosforu między trzema badanymi typami otoczek, przy czym wartości wynosiły: bez otoczki – $2,38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, otoczka 1 – $2,48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, otoczka 2 – $2,50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, co dało zakres zmienności $0,12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Czynniki C (dawka azotu) nie spowodował istotnych różnic w zawartości fosforu między dawkami, przy czym przy niższej dawce azotu (135 kg N/ha) odnotowano wyższą zawartość fosforu ($2,52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż w przypadku aplikacji wyższej dawki tego makroskładnika – $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($2,39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), z różnicą $0,13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Analiza według lat badania ujawniła pewne trendy, chociaż statystycznie nieistotne. W roku I średnia zawartość fosforu wynosiła $2,33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy współczynniku zmienności 6,5%. Rok II charakteryzował się bardzo podobną średnią zawartością analizowanego pierwiastka $2,34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i współczynnikiem zmienności 6,7%. Natomiast rok III wykazał wyraźnie wyższą średnią zawartość fosforu $2,69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy największej zmienności (CV = 8,6%). Różnica między latami wyniosła $0,36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, co stanowiło największe źródło zmienności w eksperymencie, chociaż mniejsze niż w przypadku azotu ogółem ($0,81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Analiza interakcji dwuczynnikowych ujawniła kilka interesujących wzorców. Interakcja rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu pokazała, że w przypadku mocznika dawka $135 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ dała wyższą zawartość fosforu ($2,58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż dawka $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($2,39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), podczas gdy dla nawozu wieloskładnikowego NPK różnice były mniejsze ($2,45$ vs $2,38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Interakcja rodzaj nawozu $\times$ rodzaj otoczki wykazała, że w przypadku mocznika najwyższą zawartość fosforu odnotowano przy otoczce typu 1 ($2,52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), podczas gdy dla nawozu wieloskładnikowego NPK najwyższą przy otoczce typu 2 ($2,52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Interakcja dawka azotu $\times$ rodzaj otoczki pokazała konsekwentnie wyższe wartości dla dawki 135 kg N/ha we wszystkich typach otoczek.

Oznaczenia literowe w tabeli potwierdzają wyniki analizy statystycznej. Wszystkie średnie oznaczone literą "A" oraz poszczególne wartości oznaczone małą literą

"a" wskazują, że według testu Tukeya nie ma istotnych różnic statystycznych między żadnymi porównywanymi grupami. Ta jednorodność statystyczna potwierdza brak efektywności badanych zabiegów agrotechnicznych w kształtowaniu zawartości fosforu w roślinie.

Porównanie wyników dla fosforu z wynikami dla azotu ujawnia kilka podobieństw i różnic. Oba pierwiastki wykazały brak istotności statystycznej dla wszystkich badanych czynników i ich interakcji. Jednak fosfor charakteryzował się wyższym współczynnikiem zmienności (10,0% vs 7,2% dla azotu ogółem), co może wskazywać na większą wrażliwość na czynniki środowiskowe. Zmienność między latami była mniejsza dla fosforu ($0,36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż dla azotu ($0,81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), ale w obu przypadkach stanowiła główne źródło zmienności w eksperymencie. Interesujące jest, że w przypadku fosforu obserwowano odwrotną zależność od dawki azotu - niższa dawka dawała wyższe zawartości fosforu, co może wskazywać na antagonistyczny wpływ wysokich dawek azotu na pobieranie fosforu przez rośliny.

Wyniki badania prowadzą do wniosku, że podobnie jak w przypadku azotu, żaden z badanych czynników nie wpłynął istotnie na zawartość fosforu w roślinie. Dominujący wpływ miały warunki środowiskowe, szczególnie obserwowane w roku III, w którym odnotowano wyraźnie wyższą zawartość fosforu. Stabilność wyników we wszystkich kombinacjach czynników może wskazywać na odpowiednią naturalną dostępność fosforu w glebie. Z praktycznego punktu widzenia, zwiększanie dawki azotu z 135 do 180 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ może wpływać na obniżenie zawartości fosforu w roślinie, co sugeruje potrzebę zbalansowanego nawożenia uwzględniającego interakcje między składnikami pokarmowymi. Analiza wskazuje na potrzebę dalszych badań z uwzględnieniem szerszego zakresu dawek, różnych źródeł fosforu oraz analizy interakcji N-P w celu optymalizacji programu nawożenia.

7.1.3. Zawartość potasu w kukurydzy

Tabela 5 zawiera wyniki trójczynnika eksperymentu polowego prowadzonego przez trzy lata, badającego wpływ rodzaju nawozu azotowego, rodzaju otoczki nawozu oraz dawki azotu na zawartość potasu w roślinie.

Tabela 5. Zawartość potasu w roślinie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N · ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	6,42a	8,10a	7,09a	7,20A	7,52a	7,84a	7,28a	7,54A	7,18a
	135	6,94a	7,27a	7,23a	7,14A	7,19a	7,46a	7,50a	7,38A	A
	śr.	6,68A	7,68A	7,16A		7,35A	7,65A	7,39A		A
	śr.	7,17A				7,46A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	6,33a	8,19a	7,09a	7,20A	7,63a	7,87a	7,24a	7,58A	7,16a
	135	6,97a	7,27a	7,13a	7,12A	7,15a	7,47a	7,46a	7,36A	A
	śr.	6,65A	7,73A	7,11A		7,39A	7,67A	7,35A		A
	śr.	7,16A				7,47A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
III	180	8,10a	8,84a	8,95a	8,63A	9,48a	10,30a	10,66a	10,14A	10,74a
	135	9,29a	7,77a	10,03a	9,03A	7,77a	9,16a	8,55a	8,49A	A
	śr.	8,70A	8,30A	9,49A		8,62A	9,73A	9,60A		A
	śr.	8,83A				9,32A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – $\eta^2_p = 15,74\%$		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
Śr.	180	6,95a	8,37a	7,71a	7,67A	8,21a	8,67a	8,39a	8,42A	8,36a
	135	7,73a	7,44a	8,13a	7,76A	7,37a	8,03a	7,83a	7,74A	A
	śr.	7,34A	7,91A	7,92A		7,79A	8,35A	8,11A		A
	śr.	7,72A				8,08A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		

Zawartość potasu w kukurydzy wahała się od 6,33 do 10,66 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy średniej wartości 7,89 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i odchyleniu standardowym 1,03 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Tabela 5). Współczynnik zmienności wynosił 13,0%, co stanowi najwyższą zmienność spośród wszystkich badanych pierwiastków (N – 7,2%, P – 10,0%). Zakres wartości potasu był znacznie szerszy niż fosforu i większy niż azotu w ujęciu względnym, co wskazuje na większą wrażliwość zawartości potasu na badane czynniki eksperymentalne i warunki środowiskowe.

Analiza wariancji wykazała, że większość badanych czynników okazała się statystycznie nieistotna przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$, jednak w roku III wykryto istotną tendencję w interakcji rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu ($\eta^2_p = 15,74\%$).

Czynnik A (rodzaj nawozu) nie wykazał istotnych różnic statystycznych, choć w przypadku mocznika stosowanego w mieszaninie z superfosfatem i siarczanem potasu uzyskano średnio niższą zawartość potasu ($7,72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) niż w wariancie z nawozem wieloskładnikowym NPK ($8,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), a różnica wyniosła $0,36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Czynniki B (rodzaj otoczki) również okazał się nieistotny statystycznie, ale wartości wykazywały pewną tendencję: otoczka 1 – $8,13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, otoczka 2 – $8,02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, bez otoczki – $7,57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, z zakresem zmienności $0,56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Czynniki C (dawka azotu) nie spowodował istotnych różnic, ale wyższa dawka $180 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ dała nieznacznie wyższą zawartość potasu ($8,05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) niż dawka $135 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($7,75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), z różnicą $0,30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

W przeprowadzonym eksperymencie polowym odnotowano istotną tendencję w interakcji rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu w roku III ($\eta^2_p = 15,74\%$). Kombinacja nawóz wieloskładnikowy NPK w dawce $180 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ w trzecim roku badań dała najwyższą zawartość potasu w całym eksperymencie ($10,66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Różnice w zawartości potasu w poszczególnych kombinacjach nawozowych wskazują na synergistyczny efekt wysokiej dawki azotu w nawozie NPK w korzystnych warunkach środowiskowych roku III. Interakcja ta sugeruje, że optymalizacja nawożenia potasowego może wymagać uwzględnienia zarówno źródła azotu, jak i jego dawki.

Analiza uzyskanych zawartości potasu według lat badania ujawniła znaczącą zmienność czasową, największą spośród wszystkich badanych pierwiastków. W roku I średnia zawartość potasu wynosiła $7,32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ przy współczynniku zmienności $5,8\%$. Rok II charakteryzował się identyczną średnią $7,32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i nieznacznie wyższym współczynnikiem zmienności $6,4\%$. Natomiast rok III wykazał wyraźnie wyższą średnią zawartość potasu $9,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ przy największej zmienności ($CV = 10,2\%$). Różnica między rokiem III a latami I-II wyniosła $1,76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, co stanowiło główne źródło zmienności w eksperymencie i wskazuje na silny wpływ warunków środowiskowych na mobilizację i pobieranie potasu przez rośliny.

Analiza interakcji dwuczynnikowych ujawniła kilka istotnych wzorców. Interakcja rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu pokazała, że w przypadku mocznika różnice między dawkami azotu w zawartości potasu były minimalne ($7,67$ vs $7,76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), podczas gdy w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK wyższa dawka azotu powodowała wyraźny wzrost zawartości potasu ($8,42$ vs $7,74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Interakcja rodzaj nawozu $\times$ rodzaj otoczki wykazała, że mocznik konsekwentnie dawał wyższe zawartości potasu we wszystkich typach otoczek, z największą różnicą dla otoczki typu 1. Interakcja

dawka azotu $\times$ rodzaj otoczki pokazała, że wyższa dawka azotu była szczególnie korzystna dla otoczki typu 1, gdzie różnica wyniosła $0,79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($8,52$ vs $7,73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Oznaczenia literowe w tabeli częściowo potwierdzają wyniki analizy statystycznej. Większość średnich oznaczona literą "A" oraz poszczególne wartości oznaczone małą literą "a" wskazują na brak istotnych różnic statystycznych między większością porównywanych grup. Jednak wykrycie istotnej tendencji w interakcji AxC w roku III sugeruje, że w sprzyjających warunkach środowiskowych możliwe jest uzyskanie istotnych różnic w zawartości potasu przy odpowiedniej kombinacji nawożenia.

Porównanie uzyskanych wyników badań dla potasu z wynikami dla azotu i fosforu ujawnia kilka kluczowych różnic. Potas wykazał najwyższy współczynnik zmienności ($13,0\%$) spośród wszystkich pierwiastków, co wskazuje na największą wrażliwość na czynniki eksperymentalne i środowiskowe. Zmienność między latami dla potasu była bardzo duża ($1,76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), podobnie jak dla azotu, ale znacznie większa niż dla fosforu. Należy podkreślić, że tylko dla potasu wykryto istotną tendencję statystyczną w interakcji, co sugeruje, że ten pierwiastek najbardziej reaguje na optymalizację nawożenia azotowego. Potas wykazał również pozytywną reakcję na mocznik i wyższą dawkę azotu, w przeciwieństwie do fosforu, gdzie obserwowano antagonistyczny wpływ wysokich dawek azotu.

Wyniki badania prowadzą do wniosku, że potas jest pierwiastkiem najbardziej wrażliwym na badane czynniki eksperymentalne. Chociaż większość efektów głównych pozostała statystycznie nieistotna, wykrycie istotnej tendencji w interakcji rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu wskazuje na możliwość optymalizacji nawożenia potasowego. Dominujący wpływ warunków środowiskowych, szczególnie w roku III, potwierdza znaczenie czynników klimatycznych w mobilizacji potasu w glebie. Z praktycznego punktu widzenia, kombinacja mocznika z wyższą dawką azotu ($180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) może być korzystna dla zwiększenia zawartości potasu w roślinie, szczególnie w sprzyjających warunkach środowiskowych. Otoczka typu 1 wykazywała konsekwentnie najwyższe wartości, co może wskazywać na jej przydatność w systemach nawożenia kontrolowanego uwalniania. Analiza wskazuje na potrzebę dalszych badań z uwzględnieniem szerszego zakresu dawek azotu, różnych źródeł potasu oraz szczegółowej analizy interakcji N-K-warunki środowiskowe w celu pełnej optymalizacji programu nawożenia uwzględniającego wszystkie makroelementy.

7.1.4. Zawartość magnezu w kukurydzy

Analiza statystyczna zawartości magnezu w roślinie ujawniła wyjątkową stabilność tego pierwiastka w porównaniu do pozostałych analizowanych makroelementów. Wyniki charakteryzowały się brakiem istotnych różnic statystycznych dla wszystkich badanych czynników oraz ich interakcji we wszystkich latach eksperymentu, co wskazuje na zrównoważony charakter gospodarki magnezowej w roślinie (Tabela 6).

Tabela 6. Zawartość magnezu w roślinie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	0,77a	0,78a	0,75a	0,77A	0,77a	0,81a	0,75a	0,78A	0,80a
	135	0,80a	0,73a	0,80a	0,79A	0,78a	0,80a	0,81a	0,80A	A
	śr.	0,79A	0,77A	0,78A		0,78A	0,81A	0,78A		A
	śr.	0,78A				0,79A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	0,80a	0,79a	0,78a	0,79A	0,73a	0,82a	0,78a	0,78A	0,83a
	135	0,79a	0,73a	0,80a	0,78A	0,79a	0,80a	0,82a	0,80A	A
	śr.	0,80A	0,76A	0,79A		0,76A	0,81A	0,80A		A
	śr.	0,78A				0,79A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
III	180	0,73a	0,70a	0,74a	0,72A	0,77a	0,77a	0,81a	0,78A	0,72a
	135	0,69a	0,73a	0,77a	0,73A	0,79a	0,77a	0,76a	0,77A	A
	śr.	0,71A	0,72A	0,76A		0,78A	0,77A	0,79A		A
	śr.	0,73A				0,78A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
Śr.	180	0,76a	0,76a	0,76a	0,76A	0,76a	0,80a	0,78a	0,78A	0,78a
	135	0,76a	0,74a	0,79a	0,77A	0,79a	0,79a	0,80a	0,79A	A
	śr.	0,76A	0,75A	0,78A		0,77A	0,80A	0,79A		A
	śr.	0,76A				0,79A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		

Średnia zawartość magnezu w kukurydzy wykorzystywanej na paszę i do celów rolniczych zgodnie z danymi literaturowymi (Książak, 2012) powinna mieścić się

w zakresie $1,7 - 4,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, czyli $0,17 - 0,4\%$ suchej masy. Wynika z tego, że wartości $0,76 - 0,79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ uzyskane w badaniu są bliskie dolnej granicy lub poniżej optymalnego zakresu dla tej rośliny. Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli (A, a) potwierdzają przynależność średnich do jednej grupy jednorodnej, co świadczy o braku statystycznie istotnych różnic między badanymi wariantami.

W przeciwieństwie do azotu i potasu, magnez wykazał najmniejszą wrażliwość na warunki środowiskowe. Średnie w latach badań zawartości magnezu wahały się w wąskim przedziale: rok I ($0,77 - 0,81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), rok II ($0,76 - 0,81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), rok III ($0,71 - 0,79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Współczynnik zmienności między latami był znacznie niższy niż dla pozostałych pierwiastków, co potwierdza stabilną naturę magnezu w systemie roślina – gleba.

Rodzaj nawozu (mocznik, NPK) nie wywierał istotnego wpływu na zawartość magnezu w roślinie. Średnie wartości dla poszczególnych sposobów nawożenia mieściły się w przedziale $0,75 - 0,80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, bez wyraźnych tendencji preferujących określony typ nawożenia. Podobnie dawka azotu (135 vs $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie różnicowała istotnie zawartości magnezu.

Różne typy otoczek (0, 1, 2) nie wpłynęły znacząco na zawartość magnezu w roślinie. Otoczka typu 1 w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK wykazywała nieznacznie wyższe zawartości magnezu ($0,80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w porównaniu z pozostałymi wariantami, jednak różnice te pozostały statystycznie nieistotne.

Magnez odgrywa kluczową rolę jako centralny atom w cząsteczce chlorofilu pełniąc ważną funkcję w procesie fotosyntezy. Rośliny utrzymują ścisłą homeostazę magnezu poprzez mechanizmy transportu i akumulacji, co prowadzi do względnie stałej zawartości niezależnie od warunków nawożenia.

W przeprowadzonym eksperymencie polowym w zawartości magnezu w kukurydzy nie stwierdzono istotnych różnic w żadnym z badanych czynników czy ich interakcji, co kontrastuje z azotem (istotne różnice między latami) i potasem (istotna tendencja w interakcji nawóz $\times$ dawka). Współczynnik zmienności magnezu był najniższy spośród wszystkich badanych pierwiastków, co potwierdza jego szczególną stabilność w systemie nawożenia.

Brak istotnych różnic w zawartości magnezu może również wynikać z mechanizmów antagonizmu z potasem i azotem amonowym. Wysokie dawki azotu i potasu mogą ograniczać pobieranie magnezu przez mechanizm konkurencji kationowej, co potwierdzają badania pokazujące wpływ tych składników na akumulację magnezu

w roślinach (Nowacka i in., 2010). Jednak w badanym eksperymencie efekt ten nie był na tyle silny, aby wywołać istotne statystycznie różnice.

Wyniki wskazują na magnez jako pierwiastek o najwyższej stabilności w systemie nawożenia roślin. Brak reakcji na różne formy nawożenia i systemy kontrolowanego uwalniania sugeruje, że zawartość magnezu w roślinie jest regulowana przede wszystkim przez czynniki wewnętrzne (homeostaza roślinna) oraz właściwości gleby, a nie przez intensywność czy sposób nawożenia.

Stabilna zawartość magnezu na poziomie $0,76 - 0,79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ w całym eksperymencie wskazuje na odpowiedni status magnezowy gleby, co eliminuje potrzebę intensywnego nawożenia tym pierwiastkiem w badanych warunkach. Systemy kontrolowanego uwalniania nie przyniosły dodatkowych korzyści dla magnezu, co może sugerować, że konwencjonalne nawożenie jest wystarczające dla utrzymania optymalnej zawartości tego pierwiastka.

7.1.5. Zawartość siarki w kukurydzy

Analiza zawartości siarki w roślinie w przeprowadzonym trójczynnikiem eksperymencie wykazała odmienny charakter w porównaniu z potasem. Podczas gdy potas cechował się wysoką zmiennością i wyraźną podatnością na czynniki nawozowe oraz środowiskowe, siarka okazała się pierwiastkiem niezwykle stabilnym, o niemal niezmiennych wartościach niezależnie od lat badań i badanych czynników agrotechnicznych. Średnia zawartość siarki w roślinie utrzymywała się w bardzo wąskim zakresie $4,11 - 4,44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a różnice między poszczególnymi latami nie przekraczały $0,06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, co wskazuje na wyjątkową powtarzalność wyników i niewielki wpływ zmiennych warunków pogodowych na akumulację tego składnika.

Tabela 7. Zawartość siarki siarczanowej w roślinie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	0,443a	0,414a	4,14a	0,423A	0,425a	0,428a	0,435a	0,429A	0,422a
	135	0,431a	0,431a	4,25a	0,429A	0,434a	0,428a	0,434a	0,432A	A
	śr.	0,437A	0,422A	4,19A		0,429A	0,428A	0,435A		A

Rok	Dawka N, kg N · ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
	śr.	0,426A				0,431A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		Ax B – n.s. Ax C – n.s.		Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.	
II	180	0,440a	0,412a	0,412a	0,422A	0,424a	0,425a	0,432a	0,427A	0,422a
	135	0,431a	0,433a	0,423a	0,429A	0,431a	0,427a	0,434a	0,431A	A
	śr.	0,436A	0,423A	0,418A		0,428A	0,426A	0,433A		A
	śr.	0,425A				4,29A				A
		A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		Ax B – n.s. Ax C – n.s.		Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.
III	180	0,444a	0,411a	0,412a	0,422A	0,426a	0,428a	0,435a	0,429A	0,422a
	135	0,430a	0,433a	0,424a	0,429A	0,437a	0,430a	0,435a	0,434A	A
	śr.	0,437A	0,422A	0,418A		0,431A	0,429A	0,435A		A
	śr.	0,426A				0,432A				A
		A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		Ax B – n.s. Ax C – n.s.		Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.
Śr.	180	0,442a	0,412a	0,413a	0,422A	0,425a	0,427a	0,434a	0,429A	0,422a
	135	0,431a	0,432a	0,424a	0,429A	0,434a	0,428a	0,434a	0,432A	A
	śr.	0,437A	0,422A	0,418A		0,429A	0,428A	0,434A		A
	śr.	0,426A				0,430A				A
		A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		Ax B – n.s. Ax C – n.s.		Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.

Czynniki doświadczalne nie wywierały istotnego wpływu na zawartość siarki siarczanowej w kukurydzy. Najwyższe zawartości siarki siarczanowej odnotowano przy nawożeniu roślin nawozem wieloskładnikowym NPK (0,429 – 0,432 g·kg⁻¹), natomiast zastosowanie mocznika prowadziło do nieznacznego obniżenia jej koncentracji w kukurydzy (0,425 – 0,426 g·kg⁻¹). Analizując wpływ dawki azotu (czynnik C) na zawartość siarki siarczanowej należy stwierdzić, że wyższe zawartości tej formy siarki stwierdzono przy niższej dawce azotu, które wynosiły – 0,429 g·kg⁻¹ w przypadku mocznika i 0,431 – 0,434 g·kg⁻¹ w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK.

Wpływ rodzaju otoczki (czynnik B) wykazywał pewne zróżnicowanie, jednak bez istotności statystycznej. W przypadku mocznika zastosowanie otoczek prowadziło do obniżenia zawartości siarki siarczanowej względem wariantu bez otoczki, natomiast w przypadku nawozu wieloskładnikowego otoczka typu 2 wiązała się z nieco wyższą zawartością pierwiastka niż pozostałe warianty.

Analiza statystyczna przeprowadzona testem Tukeya (HSD) jednoznacznie wykazała brak istotnych różnic dla wszystkich czynników głównych oraz interakcji dwuczynnikowych i trójczynnikowych przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Oznacza to, że zawartość siarki w badanych warunkach pozostawała niezależna od rodzaju nawozu, jego dawki oraz technologii otoczkowania. W przeciwieństwie do potasu, dla którego stwierdzono istotną tendencję w interakcji rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu i silny wpływ warunków pogodowych, siarka siarczanowa wykazała cechy pierwiastka podlegającego ścisłej homeostatycznej regulacji.

Stabilność zawartości siarki może wynikać z jej znaczenia metabolicznego, gdyż jest ona składnikiem aminokwasów siarkowych (cystyny, cysteiny i metioniny) oraz licznych związków bioaktywnych, co sprawia, że jej poziom w tkankach roślinnych podlega silnej kontroli biologicznej. Brak zmienności może być również konsekwencją odpowiedniej zasobności gleby w siarkę, co sprawiało, że rośliny nie były ograniczone dostępnością tego pierwiastka, a różnice w nawożeniu nie przekładały się na jego akumulację.

Z praktycznego punktu widzenia uzyskane wyniki badań wskazują, że status siarkowy roślin w badanych warunkach uprawowych pozostaje niezależny od zastosowanego źródła azotu, jego dawki oraz rodzaju otoczki nawozowej. Wskazuje to na wysoki stopień samoregulacji pobierania siarki i odmienny charakter jej dynamiki w porównaniu z potasem, który w tych samych warunkach wykazał podatność na optymalizację nawożenia. Stabilność uzyskanych wyników potwierdza także powtarzalność warunków eksperymentalnych i wskazuje, że ewentualne dalsze badania wymagają rozszerzenia o szerszy zakres źródeł siarki lub sytuacje deficytowe, aby możliwe było pełniejsze określenie reakcji roślin na nawożenie azotowo-siarkowe.

7.2. Zawartość mikroelementów w kukurydzy

7.2.1. Zawartość cynku w kukurydzy

Analiza statystyczna zawartości cynku w kukurydzy ujawniła umiarkowaną wrażliwość tego mikroelementu na badane czynniki eksperymentalne, z wykrytym istotnym wpływem dawki azotu w roku I ($\eta^2_p = 20,07\%$) na zawartość tego mikroelementu (Tabela 8). Wyniki charakteryzowały się znacznie większą zmiennością niż w przypadku magnezu i manganu, co wskazuje na większą wrażliwość cynku na warunki nawożenia.

Tabela 8. Zawartość cynku w roślinie ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	12,77a	13,03a	15,53a	13,78AB	15,67a	15,80a	14,43a	15,30B	12,93a
	135	14,47a	13,17a	12,00a	13,21AB	11,97a	13,77a	12,30a	12,68A	AB
	śr.	13,62A	13,10A	13,77A		13,82A	14,78A	13,37A		A
	śr.	13,49A				13,99A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – $\eta^2_p = 20,07\%$			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	12,57a	14,81a	14,77a	14,05A	15,93a	14,00a	14,56a	14,83A	12,07a
	135	12,88a	13,89a	10,60a	12,46A	15,97a	12,24a	16,60a	14,94A	A
	śr.	12,73A	14,35A	12,69A		15,95A	13,12A	15,58A		A
	śr.	13,25A				14,88A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
III	180	13,61a	13,00a	14,65a	13,75A	13,92a	13,17a	12,67a	13,25A	11,97a
	135	13,33a	12,40a	12,67a	12,80A	11,58a	13,13a	14,00a	12,90A	A
	śr.	13,47A	12,70A	13,66A		12,75A	13,15A	13,33A		A
	śr.	13,28A				13,08A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
Śr.	180	12,98a	13,62a	14,98a	13,86A	15,17a	14,32a	13,89a	14,46A	12,32a
	135	13,56a	13,15a	11,76a	12,82A	13,17a	13,05a	14,30a	13,51A	A
	śr.	13,27A	13,38A	13,37A		14,17A	13,69A	14,09A		A
	śr.	13,34A				13,98A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		

Średnia zawartość cynku w całym eksperymencie wynosiła 11,76 – 15,17 mg·kg⁻¹ suchej masy, co mieści się w dolnej części zakresu optymalnego dla kukurydzy, który według literatury wynosi około 15 – 40 mg·kg⁻¹ suchej masy (Mutambu, 2023). Wartości te są bliskie progowi niedoboru cynku (15 – 20 mg·kg⁻¹), co wskazuje na suboptymalne zaopatrzenie roślin w ten mikroelement.

W przeprowadzonym eksperymencie polowym stwierdzono statystycznie istotny wpływ dawki azotu ($\eta^2p = 20,07\%$) w roku I na zawartość cynku w kukurydzy, gdzie wyższa dawka azotu (180 kg N·ha⁻¹) wiązała się z uzyskaniem większej zawartości cynku (14,54 mg·kg⁻¹) w roślinie testowej w porównaniu z niższą dawką azotu (12,94 mg·kg⁻¹). Ten efekt był najsilniejszy spośród wszystkich badanych mikroelementów., co wskazuje na szczególne znaczenie interakcji azot-cynk w odżywianiu roślin.

Cynk wykazał umiarkowaną zmienność między latami, z najwyższymi średnimi w roku I (13,49 – 13,99 mg·kg⁻¹) oraz niższymi w latach II i III (około 13,08 – 14,88 mg·kg⁻¹). Różnice między latami były mniejsze niż w przypadku potasu, ale większe niż dla magnezu, co potwierdza pośrednią wrażliwość cynku na czynniki środowiskowe.

Pozytywna interakcja między azotem a cynkiem ma podłoże fizjologiczne w synergii metabolicznej. Cynk, będący kofaktorem ponad 300 enzymów uczestniczących w metabolizmie białek, współdziała z azotem, który jest głównym składnikiem aminokwasów. Wyższa dostępność azotu zwiększa zapotrzebowanie na cynk poprzez intensyfikację syntezy białek i procesów enzymatycznych, co tłumaczy obserwowaną pozytywną korelację w roku I (Nowacka i in., 2010).

Rodzaj nawozu nie wywierał statystycznie istotnego wpływu na zawartość cynku w roślinie testowej, chociaż nawóz wieloskładnikowy wykazywał nieznaczną tendencję do wyższych zawartości w niektórych wariantach nawożenia. Różne typy otoczek również nie różnicowały istotnie zawartości cynku w kukurydzy, co wskazuje na ograniczony wpływ systemów kontrolowanego uwalniania na dostępność tego mikroelementu dla roślin.

Dostępność cynku jest silnie zależna od pH gleby – maleje około 100-krotnie przy wzroście pH o jedną jednostkę powyżej 6,5. Dodatkowo wysokie zawartości fosforu mogą wywoływać niedobór cynku poprzez tworzenie nierozpuszczalnych fosforanów cynku, co może tłumaczyć suboptymalne poziomy cynku obserwowane w eksperymencie (Szulc, 2012).

Zawartość cynku w przedziale 11,76 – 15,17 mg·kg⁻¹ znajduje się w strefie granicznej między niedoborem a wystarczającym zaopatrzeniem roślin, które według literatury wynosi około 15 – 20 mg·kg⁻¹. Niedobór cynku (poniżej tego zakresu) objawia się chlorozą międzyżyłkową młodych liści, karłowatością oraz zmniejszoną syntezą chlorofilu, co zostało szeroko opisane w badaniach fitopatologicznych (Nowacka, 2010). Obserwowane zawartości cynku mogą wskazywać na potencjalne ryzyko subklinicznego niedoboru tego mikroelementu.

W przeprowadzonym eksperymencie polowym cynk wyróżnił się jako mikroelement o największej wrażliwości na dawkę azotu, w przeciwieństwie do manganu, gdzie wykryto jedynie słaby wpływ otoczki na zawartość tego mikroelementu. Istotność statystyczna dla dawki azotu ($\eta^2p = 20,07\%$) była znacznie wyższa niż wszystkie inne efekty obserwowane dla mikroelementów w przeprowadzonym eksperymencie.

Suboptymalne poziomy cynku w połączeniu z istotnymi efektami dawki azotu wskazują na potrzebę optymalizacji nawożenia cynkiem, zwłaszcza przy intensywnym nawożeniu azotowym. Cynk, jako składnik ponad 300 enzymów, odgrywa kluczową rolę w efektywności wykorzystania azotu przez rośliny, co potwierdzają badania dotyczące nawożenia kukurydzy i innych roślin uprawnych (Szulc, 2012).

Wyniki wskazują na cynk jako mikroelement wymagający szczególnej uwagi w programach nawożenia. Pozytywna reakcja na wyższą dawkę azotu w roku I sugeruje konieczność zwiększonego zaopatrzenia w cynk przy intensywnym nawożeniu azotowym. Zawartość cynku bliska progu niedoboru (11,76 – 15,17 mg·kg⁻¹) wskazuje na potrzebę suplementacji tym mikroelementem.

Brak reakcji na systemy kontrolowanego uwalniania sugeruje, że konwencjonalne nawożenie cynkiem może być wystarczające, pod warunkiem odpowiedniego dostosowania dawek do intensywności nawożenia azotowego. Monitorowanie zawartości cynku poprzez analizy tkankowe powinno być standardową praktyką, szczególnie w systemach z wysokimi dawkami azotu.

7.2.2. Zawartość manganu w kukurydzy

Analiza statystyczna zawartości manganu w roślinach wykazała umiarkowaną wrażliwość tego mikroelementu na badane czynniki eksperymentalne (Tabela 9). Szczególnie zauważalny był słaby wpływ rodzaju otoczki w drugim roku badań ($\eta^2p =$

1,54%) oraz w całościowym zestawieniu danych z trzech lat, gdzie udział tego czynnika wyniósł 6,05%. Wyniki cechowały się większą zmiennością niż w przypadku magnezu, ale nadal były mniej zmienne niż makroelementy.

Tabela 9. Zawartość manganu w roślinie ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	20,43a	28,50a	21,27a	23,40A	18,10a	23,63a	19,03a	20,26A	26,43a
	135	19,43a	27,80a	27,70a	24,98A	23,97a	21,53a	19,97a	21,82A	A
	śr.	19,93A	28,15A	24,48A		21,03A	22,58A	19,50A		A
	śr.	24,19A				21,04A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
II	180	13,30a	32,33a	24,60a	23,41A	19,63a	24,73a	36,60a	26,99A	20,53a
	135	28,80a	34,93a	22,40a	28,71A	21,83a	36,57a	30,00a	29,47A	A
	śr.	21,05A	33,63A	23,50A		20,73A	30,65A	33,30A		A
	śr.	26,06A				28,23A				A
	A – n.s. B – $\eta^2_p = 1,54\%$				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	16,43a	19,53a	17,58a	17,85A	17,57a	17,07a	15,17a	16,60A	18,83a
	135	17,40a	13,23a	13,47a	14,70A	15,30a	14,17a	25,30a	18,26A	A
	śr.	16,92A	16,38A	15,52A		16,43A	15,62A	20,23A		A
	śr.	16,27A				17,43A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
Śr.	180	16,72a	26,79a	21,15a	21,55A	18,43a	21,81a	23,60a	21,28A	21,93a
	135	21,88a	25,32a	21,19a	22,80A	20,37a	24,09a	25,09a	23,18A	A
	śr.	19,30A	26,06A	21,17A		19,40A	22,95A	24,34A		A
	śr.	22,17A				22,23A				A
	A – n.s. B – $\eta^2_p = 6,05\%$				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	

Średnia zawartość manganu w kukurydzy w prowadzonym eksperymencie polowym wahała się w przedziale $16,72 - 26,79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ suchej masy, co mieści się w typowym zakresie dla kukurydzy wynoszącym około $15 - 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ suchej masy (Kabata-Pendias, 2011). Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej (A, a), mimo wykrytych słabych efektów statystycznych, co wskazuje na subtelny charakter różnic między wariantami. Mangan wykazał wyraźną zmienność między latami, z najwyższymi średnimi w roku I i II ($21,04 - 24,19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i

26,06 – 28,23 mg·kg⁻¹) oraz najniższą w roku III (16,27 – 17,43 mg·kg⁻¹). Różnica między rokiem III a latami poprzednimi wynosiła około 4 – 8 mg·kg⁻¹, co stanowi istotną zmianę w kontekście fizjologii mikroelementów. Ta zmienność może wynikać z różnych warunków pH gleby oraz dostępności tlenu (warunków oksydacyjno-redukcyjnych) w środowisku glebowym w poszczególnych latach badań.

W przypadku aplikacji nawozów wieloskładnikowych z otoczką typu 2 uzyskano konsekwentnie najwyższe zawartości manganu w kukurydzy w analizie zbiorczej (24,34 mg·kg⁻¹), podczas gdy stosowanie nawozów bez otoczki (typ 0) skutkowało osiągnięciem najniższych zawartości manganu (19,40 mg·kg⁻¹). Różnica 4,94 mg·kg⁻¹ między skrajnymi wariantami, mimo statystycznej nieistotności w oznaczeniach literowych, została potwierdzona wskaźnikiem siły efektu $\eta^2p = 6,05\%$ w analizie zbiorczej. To sugeruje, że systemy kontrolowanego uwalniania mogą wpływać na dostępność manganu, prawdopodobnie poprzez modyfikację pH wokół granulki nawozu.

Rodzaj nawozu nie wywierał statystycznie istotnego wpływu na zawartość manganu w kukurydzy, chociaż w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK odnotowano nieco wyższą zawartość manganu (22,23 mg·kg⁻¹) w porównaniu z mocznikiem (22,17 mg·kg⁻¹). Podobnie dawka azotu nie różnicowała istotnie zawartości manganu w roślinie testowej, co wskazuje na względną niezależność gospodarki manganowej od intensywności nawożenia azotowego w prowadzonym eksperymencie polowym.

Stabilna zawartość manganu mimo różnych systemów nawożenia wynika z silnego wpływu pH gleby na dostępność tego mikroelementu. Dostępność manganu maleje 100-krotnie przy wzroście pH o jedną jednostkę, co sprawia, że czynniki wpływające na odczyn gleby mają kluczowe znaczenie. Systemy kontrolowanego uwalniania mogą lokalnie modyfikować pH w strefie korzeniowej, co tłumaczy obserwowany słaby wpływ rodzaju otoczki.

Mangan wykazał pośredni poziom wrażliwości między stabilnym magnezem, a bardzo zmiennym potasem. W przeciwieństwie do magnezu, gdzie nie wykryto żadnych efektów statystycznych, dla manganu zaobserwowano słaby, ale mierzalny wpływ rodzaju otoczki na zawartość tego mikroelementu. Brak antagonizmu z azotem, obserwowany w przypadku niektórych innych mikroelementów, może wyjaśniać stabilność zawartości manganu przy różnych dawkach azotu.

Mangan pełni kluczową rolę w fotosystemie II oraz jako kofaktor licznych enzymów, w tym dysmutazy nadadtlenkowej. Zawartość manganu w przedziale 16 – 27

mg·kg⁻¹ pozostaje w dolnej części zakresu optymalnego (20 – 500 mg·kg⁻¹), co wskazuje na odpowiednią, ale nie nadmierną dostępność tego mikroelementu.

Niedobór manganu (poniżej 15–20 mg·kg⁻¹) objawia się żółknięciem przestrzeni między nerwami młodych liści (chloroza międzyżyłkowa), natomiast nadmiar tego pierwiastka (powyżej 500 mg·kg⁻¹) może powodować toksyczność, objawiającą się nekrotycznymi plamami na liściach. W badanym eksperymencie obserwowane wartości mieściły się w bezpiecznym zakresie, daleko od progów niedoboru i toksyczności, co wskazuje na prawidłowe zaopatrzenie roślin w mangan (Szulc, 2012).

Uzyskane wyniki badań wskazują na mangan jako mikroelement o umiarkowanej wrażliwości na systemy nawożenia. Słaby, ale wykrywalny wpływ otoczki typu 2 sugeruje potencjał optymalizacji dostępności manganu poprzez systemy kontrolowanego uwalniania. Stabilność zawartości manganu przy różnych formach i dawkach azotu wskazuje, że konwencjonalne nawożenie nie zaburza znacząco gospodarki manganowej w roślinie.

Zmienność między latami podkreśla znaczenie czynników środowiskowych, szczególnie pH gleby i warunków redoks, w kontroli dostępności manganu. Otoczka typu 2 może być preferowanym wyborem w systemach nawożenia kontrolowanego uwalniania dla optymalizacji statusu manganowego roślin, choć efekt ten wymaga dalszych badań dla potwierdzenia praktycznego znaczenia.

7.2.3. Zawartość miedzi w kukurydzy

Analiza statystyczna zawartości miedzi w roślinie ujawniła najwyższą stabilność tego mikroelementu spośród wszystkich badanych pierwiastków śladowych, z brakiem jakichkolwiek istotnych różnic statystycznych dla wszystkich czynników oraz ich interakcji we wszystkich latach eksperymentu (Tabela 10). Wyniki charakteryzowały się wyjątkową jednorodnością, porównywalną jedynie z magnezem spośród makroelementów.

Tabela 10. Zawartość miedzi w roślinie (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	12	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	3,86a	4,17a	3,38a	3,81A	3,14a	4,45a	3,34a	3,64A	4,15a
	135	3,88a	3,74a	3,83a	3,82A	4,06a	3,93a	3,92a	3,97A	A

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	12	śr.	0	1	2	śr.	
	śr.	3,87A	3,96A	3,61A		3,60A	4,19A	3,63A		A
śr.	3,81A				3,81A				A	
A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	3,36a	4,53a	3,24a	3,71A	3,70a	3,49a	2,71a	3,30A	3,48a
	135	4,27a	5,09a	3,35a	4,24A	4,67a	4,07a	3,53a	4,09A	A
	śr.	3,82A	4,81A	3,30A		4,19A	3,78A	3,12A		A
	śr.	3,97A				3,70A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	4,25a	4,01a	4,37a	4,21A	3,44a	4,03a	4,18a	3,88A	4,00a
	135	4,46a	3,45a	3,69a	3,87A	4,18a	3,84a	4,01a	4,01A	A
	śr.	4,35A	3,73A	4,03A		3,81A	3,94A	4,09A		A
	śr.	4,04A				3,95A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
Śr.	180	3,82a	4,24a	3,67a	3,91A	3,43a	3,99a	3,41a	3,61A	3,88a
	135	4,20a	4,09a	3,63a	3,97A	4,30a	3,95a	3,82a	4,02A	A
	śr.	4,01A	4,16A	3,65A		3,87A	3,97A	3,61A		A
	śr.		3,94A			3,82A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	

Średnia zawartość miedzi w całym eksperymencie wynosiła 3,61–4,24 mg·kg⁻¹ suchej masy, co mieści się w dolnej części optymalnego zakresu dla kukurydzy, który wynosi około 5 – 15 mg·kg⁻¹ suchej masy (Kabata-Pendias, 2011). Wartości te są bliskie progowi niedoboru miedzi (4 – 5 mg·kg⁻¹), co wskazuje na suboptymalne, ale wciąż wystarczające zaopatrzenie roślin w ten mikroelement. Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli 10 pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej (A, a), co potwierdza całkowity brak statystycznie istotnych różnic między badanymi wariantami. Ta wyjątkowa stabilność odróżnia miedź od pozostałych mikroelementów – manganu (słaby wpływ otoczki) i cynku (istotny wpływ dawki azotu).

Miedź wykazała umiarkowaną zmienność między latami, z najwyższymi średnimi w roku III (3,95 – 4,04 mg·kg⁻¹) oraz nieco niższymi w roku I (3,81 mg·kg⁻¹) i roku II (3,70 – 3,97 mg·kg⁻¹). Różnice między latami były znacznie mniejsze niż dla pozostałych mikroelementów, co potwierdza większą stabilność miedzi w systemie roślina-gleba.

Stabilność zawartości miedzi wynika z jej kluczowej roli jako składnika plastocjaniny, która uczestniczy w transporcie elektronów podczas fotosyntezy, oraz z funkcji w ponad 20 enzymach. Rośliny utrzymują ścisłą homeostazę miedzi poprzez mechanizmy regulacji transportu i akumulacji, co skutkuje względnie stałą zawartością tego mikroelementu, niezależnie od warunków nawożenia (Kabata-Pendias, 2011). Rodzaj nawozu nie wywierał wpływu na zawartość miedzi, mimo że niektóre badania wskazują na pozytywną interakcję Cu-N w metabolizmie roślin. Brak reakcji na mocznik w przeciwieństwie do cynku może wynikać z różnych mechanizmów transportu i metabolizmu tych mikroelementów.

Różne typy otoczek nie wpłynęły na zawartość miedzi, co kontrastuje z obserwacjami dla manganu. Brak reakcji na systemy kontrolowanego uwalniania może wynikać z silnego wiązania miedzi przez substancje organiczne w glebie oraz jej ograniczonej mobilności.

Mimo opisywanego w literaturze antagonizmu między miedzią a cynkiem oraz żelazem, w badanym eksperymencie nie zaobserwowano wpływu tych interakcji na zawartość miedzi. Stabilna zawartość miedzi przy różnych poziomach innych mikroelementów sugeruje, że rośliny posiadają skuteczne mechanizmy buforowe, które regulują i utrzymują stały poziom tego pierwiastka niezależnie od zmian w środowisku (Jankowska i in., 2016). Zawartość miedzi $3,61 - 4,24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ znajduje się w dolnej strefie wystarczalności, tuż powyżej progu niedoboru ($4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Ta zawartość jest wystarczająca dla podstawowych funkcji fizjologicznych, ale może być limitująca w warunkach stresu lub wysokiej produktywności.

Miedź wyróżniła się jako jedyny mikroelement bez jakichkolwiek wykrytych efektów statystycznych, w przeciwieństwie do manganu ($\eta^2 p = 6,05\%$ dla otoczki) i cynku ($\eta^2 p = 20,07\%$ dla dawki azotu). Współczynnik zmienności miedzi był najniższy spośród wszystkich mikroelementów, potwierdzając jej wyjątkową stabilność.

Suboptymalne poziomy miedzi oraz brak reakcji na nawożenie wskazują na konieczność monitorowania jej statusu w długoterminowych programach nawożenia. Niska mobilność miedzi w glebie, szczególnie w warunkach wysokiego pH, może wymagać stosowania alternatywnych metod aplikacji, takich jak nawożenie dolistne (Zajączkowska i in., 2021).

Wyniki eksperymentu sugerują, że zawartość miedzi w roślinach jest bardzo stabilna i kontrolowana głównie przez właściwości gleby (pH, zawartość substancji organicznej, konkurencję jonową) oraz efektywne mechanizmy homeostazy roślinnej

(Zajązkowska i in., 2021). Stabilna zawartość miedzi na poziomie bliskim dolnej granicy wystarczalności wskazuje na odpowiedni, ale nie nadmierny status miedziowy gleby. Systemy kontrolowanego uwalniania nie przyniosły korzyści dla miedzi, co może sugerować potrzebę alternatywnych strategii nawożenia (np. dolistne) w przypadku niedoborów.

Monitorowanie zawartości miedzi poprzez analizy zawartości tego mikroskładnika w roślinach powinno być elementem długoterminowych programów nawozowych, szczególnie w systemach intensywnej produkcji, gdzie stabilność nie zawsze oznacza optymalność.

7.2.4. Zawartość żelaza w kukurydzy

Analiza zawartości żelaza w roślinie w przeprowadzonym trójczynnikiem doświadczeniu polowym ujawniła zupełnie odmienny obraz w porównaniu z siarką i częściowo potasem. O ile siarka charakteryzowała się wyjątkową stabilnością, a potas – największą wrażliwością na czynniki nawożeniowe i środowiskowe, o tyle żelazo okazało się pierwiastkiem o znacznej zmienności czasowej i przestrzennej, reagującym w sposób niejednoznaczny zarówno na rodzaj nawozu, rodzaj otoczki, jak i dawkę azotu. Zakres wartości od 58,77 do 144,97 mg·kg⁻¹ suchej masy wskazuje na ponad 2,5-krotną różnicę między skrajnymi wartościami i bardzo wysoką dynamikę procesu akumulacji tego mikroelementu (Tabela 11).

Tabela 11. Zawartość żelaza w roślinie (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	114,27a	118,10a	107,47a	113,28A	101,50a	115,13a	106,93a	107,86A	108,80a
	135	106,07a	109,17a	98,27a	104,50A	105,03a	108,80a	112,47a	108,77A	A
	śr.	110,17A	113,63A	102,87A		103,27A	111,97A	109,70A		A
	śr.	108,89A				108,31A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	122,57a	105,50a	99,87a	109,31A	78,37a	100,33a	97,27a	91,99A	137,97a
	135	109,50a	138,03a	142,20a	129,91A	116,97a	71,00a	144,97a	110,98	A
	śr.	116,03A	121,77A	121,03A		97,67A	85,67A	121,12A		A
	śr.	119,61A				101,48A				A

	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	74,90a	112,97a	76,70a	88,19AB	72,40a	64,33a	58,77a	65,17A	119,03a
	135	76,20a	86,17a	66,57a	76,31AB	60,37a	69,37a	61,60a	63,78A	B
	śr.	75,55AB	99,57B	71,63AB		66,38AB	66,85AB	60,18A		B
	śr.	82,25AB				64,47A				B
	A – 14,08% B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	103,91a	112,19a	94,68a	103,59A	84,09a	93,27a	87,66a	88,34A	121,93a
	135	97,26a	111,12a	102,34a	103,57A	94,12a	83,06a	106,34a	94,51A	A
	śr.	100,58A	111,66A	98,51A		89,11A	88,16A	97,00A		A
	śr.	103,58AB				91,42A				B
	A – $\Pi_p^2 = 3,73\%$ B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			

W ujęciu czasowym zaobserwowano wyraźną zmienność zawartości żelaza. Rok I charakteryzował się umiarkowanymi zawartościami żelaza w kukurydzy ($98,27\text{--}118,10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) przy relatywnie niewielkiej rozpiętości między wariantami. Rok II przyniósł najwyższe średnie zawartości żelaza oraz największą zmienność ($71,00\text{--}144,97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), szczególnie w wariacie przy niższej dawce azotu. Natomiast rok III okazał się okresem najmniejszej akumulacji żelaza ($58,77\text{--}119,03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), jednak to właśnie wtedy po raz pierwszy pojawiły się istotne różnice statystyczne. Czynniki A (rodzaj nawozu) wyjaśniał w tym roku 14,08% zmienności, a test Tukeya wykazał wydzielenie grup jednorodnych – najwyższe wartości uzyskano dla mocznika z otoczką typu 1 ($99,57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), wartości pośrednie dla mocznika bez otoczki i z otoczką 2 ($75,55\text{--}71,63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), natomiast najniższe dla nawozu NPK z otoczką typu 2 ($60,18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Analiza średnich trzyletnich ujawniła tendencję do wyższej zawartości żelaza w wariacie z mocznikiem ($103,58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), podczas gdy w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK charakteryzowało się najniższą wartością ($91,42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) przy największej zmienności między rodzajami otoczek. Z kolei rodzaj otoczki (czynnik B) wykazywał wyraźną zależność od nawozu i roku badań. Otoczka typu 1 sprzyjała wyższym zawartościom żelaza w kukurydzy, zwłaszcza z mocznikiem, natomiast otoczka typu 2 generowała skrajne zawartości w kolejnych sezonach – od bardzo wysokich ($144,97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w roku II) po najniższe w całym doświadczeniu ($58,77\text{--}61,60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w roku III). Warianty bez otoczki charakteryzowały się umiarkowanymi zawartościami żelaza w roślinie testowej i względnie mniejszą zmiennością.

Dawka azotu (czynnik C) nie wykazała jednoznacznego wpływu na zawartość żelaza w kukurydzy. Średnio w wariantach z mocznikiem obie dawki dawały niemal identyczne wartości (ok. $103,57 - 103,59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), natomiast w kombinacjach nawożonych nawozem wieloskładnikowym wyższa dawka prowadziła do niższej zawartości żelaza ($88,34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż dawka niższa ($94,51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Różnice te były jednak nieregularne i nie były potwierdzone statystycznie w latach I i II.

Interpretacja biologiczna wyników wskazuje, że żelazo jako mikroelement wykazuje dużą zmienność środowiskową związaną z dostępnością w glebie. Na jego pobieranie wpływa pH, warunki redoks, wilgotność, a także interakcje z innymi składnikami pokarmowymi – szczególnie fosforem, który w nawozach NPK może ograniczać dostępność Fe poprzez tworzenie trudno rozpuszczalnych kompleksów. Z kolei warianty otoczkowane mogą oddziaływać pośrednio poprzez zmiany w rizosferze, modyfikację pH czy aktywność mikroorganizmów. Pojawienie się istotnych różnic w roku III sugeruje efekt długoterminowego oddziaływania nawozów oraz możliwe zmiany właściwości gleby po kilku sezonach stosowania tych samych wariantów.

Z praktycznego punktu widzenia żelazo jawi się jako mikroelement silnie reagujący na warunki środowiskowe i wrażliwy na formę nawożenia. Mocznik, szczególnie w kombinacji z otoczką typu 1, wykazywał najkorzystniejszy wpływ na zawartość żelaza, natomiast nawozy NPK w niektórych wariantach prowadziły do wyraźnego obniżenia jego poziomu, prawdopodobnie na skutek interakcji z fosforem. Znaczna zmienność międzyroczna podkreśla konieczność systematycznego monitorowania statusu żelaza w uprawach oraz potrzebę prowadzenia doświadczeń długoterminowych z uwzględnieniem oddziaływania nawożenia na właściwości glebowe.

Wnioski wskazują, że w badanych warunkach zawartość żelaza była dużo bardziej podatna na czynniki środowiskowe niż zawartość siarki, a przy tym mniej przewidywalna niż reakcje potasu. Czyni to żelazo pierwiastkiem wymagającym szczególnej uwagi w programach nawożenia, zwłaszcza przy stosowaniu nawozów wieloskładnikowych oraz technologii kontrolowanego uwalniania.

7.3. Właściwości gleby

7.3.1. pH gleby

Tabela 12. pH gleby

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	6,17	6,27	6,33	6,42	6,13	5,97	6,70	6,27	6,67
	135	6,67	6,17	5,97	6,10	6,43	6,03	6,07	6,18	
	śr.	6,42	6,22	6,15		6,28	6,00	6,38		
	śr.	6,26				6,22				
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	6,03	5,97	5,90	5,97	5,80	6,00	5,97	5,92	6,07
	135	5,77	6,07	5,77	5,87	5,93	5,93	5,97	5,94	
	śr.	5,90	6,02	5,83		5,87	5,97	5,97		
	śr.	5,92				5,93				
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	5,97	6,03	6,03	6,01	6,03	6,07	6,03	6,04	5,80
	135	5,97	5,97	5,87	5,93	5,87	5,83	5,77	5,82	
	śr.	5,97	6,00	5,95		5,95	5,95	5,90		
	śr.	5,97				5,93				
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	6,22	6,09	6,09	6,13	5,99	6,01	6,23	6,08	6,18
	135	5,97	6,07	5,87	5,97	6,08	5,93	5,93	5,98	
	śr.	6,09	6,08	5,98		6,03	5,97	6,08		
	śr.	6,05				6,03				
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			

Wartości pH gleby mieściły się w zakresie: 5,77 – 6,70 (Tabela 12). Zastosowane nawozy miały stosunkowo niewielki wpływ na pH gleby. Najwyższe pH gleby (6,70) odnotowano w roku I badań dla NPK z otoczką typu 2 (180 kg N·ha⁻¹), a najniższe pH (5,77) wystąpiło w roku II dla mocznika z otoczką typu 2 (135 kg N·ha⁻¹). W każdym roku badań pH gleby było nieco wyższe przy wyższej dawce N (135 vs 180 kg N·ha⁻¹), co może wskazywać na łagodzący wpływ większej dawki N na zakwaszenie gleby.

Jednak wpływ dawki azotu był statystycznie nieistotny. W roku I gleba bez nawożenia miała najwyższe pH (6,67), co może sugerować zakwaszające działanie nawozów, szczególnie w krótkim okresie. W latach II i III pH gleby w obiektach bez nawożenia było niższe niż w niektórych wariantach nawożonych, co może wskazywać na łagodzenie zakwaszenia przez nawozy.

Rodzaj nawozu nie miał istotnego wpływu na pH gleby. Otoczki wpływają na szybkość uwalniania azotu – wolniejsze uwalnianie może zmniejszać chwilowe skoki kwasowości, ale w dłuższym czasie efekt jest podobny. W przypadku mocznika (w odróżnieniu od NPK) w obiektach z otoczką typu 2 stwierdzono najniższe pH, co sugeruje, że jej działanie mogło sprzyjać zakwaszeniu. Jednak wpływ rodzaju otoczki był również statystycznie nieistotny.

W podsumowaniu można stwierdzić, że najwyższe średnie pH stwierdzono w pierwszym roku badań, a najniższe w drugim roku eksperymentu polowego. Spadek pH w roku II może być związany z intensyfikacją procesów zakwaszających, np. większą mineralizacją, warunkami pogodowymi lub aktywnością mikroorganizmów. Zakwaszające działanie nawozów azotowych było widoczne, szczególnie w krótkim okresie (rok I), ale nie było statystycznie istotne. Wyższa dawka azotu ($180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) miała łagodzący wpływ na zakwaszenie gleby, choć również nieistotny statystycznie. Rodzaj nawozu i otoczki nie wykazały istotnego wpływu na pH gleby.

7.3.2. Zawartość azotu ogólnego w glebie

Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdziła, że zawartość azotu ogólnego w glebie pozostaje stabilna i nie ulega istotnym zmianom pod wpływem badanych czynników doświadczalnych. Test Tukeya (HSD) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wykazał brak różnic istotnych pomiędzy rodzajami nawozu, typami otoczek, dawkami azotu oraz ich wzajemnymi interakcjami (Tabela 13).

Tabela 13. Zawartość N ogólnego w glebie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	0,7a	0,8a	0,9a	0,8A	0,8a	3,4a	0,9a	1,7A	0,9a

	135	0,9a	0,8a	0,9a	0,9A	0,8a	3,2a	0,9a	1,6A	A
	śr.	0,8A	0,8A	0,9A		0,8A	3,3A	0,9A		A
	śr.	0,8A				1,7A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	0,8a	0,8a	0,9a	0,8A	0,9a	0,9a	0,8a	0,9A	3,3a
	135	3,4a	0,9a	0,8a	1,7A	3,3a	0,9a	0,7a	1,6A	A
	śr.	2,1A	0,8A	0,8A		2,1A	0,9A	0,8A		A
	śr.	1,2A				1,3A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
III	180	0,8a	0,8a	0,9a	0,8A	0,9a	0,9a	0,8a	0,9A	3,2a
	135	3,4a	0,9a	0,8a	1,7A	3,3a	0,9a	0,7a	1,6A	A
	śr.	2,1A	0,8A	0,8A		2,1A	0,9A	0,8A		A
	śr.	1,2A				1,3A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
Śr.	180	0,8a	0,8a	0,9a	0,8A	0,9a	1,7a	0,8a	1,1A	2,5a
	135	2,5a	0,8a	0,8a	1,4A	2,4a	1,7a	0,8a	1,6A	A
	śr.	1,6A	0,8A	0,8A		1,7A	1,7A	0,8A		A
	śr.	1,1A				1,4A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		

W każdym z trzech lat doświadczenia średnie zawartości azotu ogólnego mieściły się w wąskim przedziale od 0,8 do 0,9 g·kg⁻¹. Najniższe obserwowane wartości (0,7 g·kg⁻¹) i najwyższe (0,9 g·kg⁻¹) różniły się jedynie o 0,2 g·kg⁻¹, co świadczy o dużej jednorodności próbek oraz powtarzalności pomiarów.

Zarówno dawka azotu (135 vs 180 kg N·ha⁻¹), jak i rodzaj nawozu (bez nawożenia, mocznik, NPK) czy typ otoczki nie wpłynęły istotnie na poziom N ogólnego w glebie po zbiorze roślin testowych w każdym roku badań. Wszystkie warianty oznaczono wspólną literą homogenności „A”, co jednoznacznie wskazuje na brak istotnych różnic statystycznych.

Analiza wieloletnia nie wykazała znaczących trendów ani fluktuacji sezonowych w zawartości azotu ogólnego. Stabilność pomiarów w kolejnych latach sugeruje, że czynniki klimatyczne i sezonowe warunki glebowe w obrębie stanowiska doświadczenia miały charakter jednorodny lub efekt tych czynników został zniwelowany przez właściwości gleby.

Gleba ma zdolność do zatrzymywania jonów azotanowych i amonowych, dzięki czemu stopniowo uwalnia je do roślin, co zapobiega nagłym wahaniom ich dostępności. Dodatkowo procesy mikrobiologiczne, takie jak mineralizacja i immobilizacja azotu, działają jak bufor, ograniczając gwałtowne wahania stężenia tego składnika w glebie (Nowacka i in., 2010).

Różne formy nawozów – mocznik i NPK – nie wywołały odmiennych reakcji gleby pod względem zawartości N ogólnego. Nawet pominięcie nawożenia nie spowodowało obniżenia poziomu azotu poniżej całego zakresu obserwacji, co może wskazywać na zasobne rezerwy azotu w warstwie próchnicznej.

Testowane otoczki nawozów, mające na celu stopniowe uwalnianie składnika azotowego, okazały się nie mieć istotnego wpływu na zawartość azotu ogólnego w glebie. Pomimo teoretycznej zmiany dynamiki uwalniania, dawka dostępnego azotu w glebie utrzymywała się na stałym poziomie.

Porównanie dwóch dawek nawożenia (135 i $180 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) potwierdziło, że różnica $45 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ nie prowadzi do istotnej zmiany w zawartości azotu ogólnego w glebie. Oznacza to, że w badanych warunkach zarówno niższe, jak i wyższe dawkowanie jest równoważne pod względem zasobności gleby w azot.

Chociaż w tej analizie koncentrowano się na azocie, brak istotnych efektów interakcyjnych sugeruje, że składniki wieloskładnikowego nawozu NPK nie modyfikowały w istotny sposób poziomu azotu ogólnego. Niemniej badania uzupełniające mogłyby skupić się na oddziaływaniu azotu z fosforem i potasem.

Utrzymanie stabilnego poziomu azotu ogólnego w glebie jest istotne z punktu widzenia zasobności pokarmowej roślin. Wartość $0,8 - 0,9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ świadczy o wystarczającej podaży azotu, niekiedy przekraczającej progi krytyczne dla wielu gatunków roślin uprawnych.

Dla pełnego obrazu warto porównać powyższe wyniki z dynamiką fosforu i potasu. W glebach o podobnej pojemności sorpcyjnej często obserwuje się podobną stabilizację tych makroelementów.

Brak zmian w N ogólnego wskazuje, że zwiększanie dawek azotu w badanym zakresie może mieć ograniczone znaczenie agronomiczne. W sytuacji, gdy celem jest wzrost zawartości dostępnego azotu, warto rozważyć dawki spoza testowanego zakresu lub zastosować formy o bardziej zróżnicowanym uwalnianiu.

Gleba o wysokiej zawartości próchnicy i odpowiednim pH ma dużą zdolność do zatrzymywania składników odżywczych, w tym azotu. Dzięki temu azot jest stopniowo

uwalniany i dostępny dla roślin przez dłuższy czas, co zapobiega gwałtownym zmianom jego poziomu w glebie (Nowacka i in., 2010).

Wyniki badań wskazują, że w warunkach doświadczenia zakres dawek azotu 135 – 180 kg N·ha⁻¹ nie wpływał istotnie na zawartość azotu ogólnego w glebie, co sugeruje konieczność szerszego spojrzenia na efektywność nawożenia azotowego. W pierwszej kolejności należy rozważyć rozszerzenie zakresu dawek azotu poza dotychczas testowane wartości, aby wyznaczyć rzeczywiste granice przyrostu zasobów azotu w glebie. Równocześnie zaleca się przeprowadzenie badań profilowych, które obejmują głębsze warstwy gleby oraz dłuższy okres czasu. Takie badania pozwolą lepiej zrozumieć, jak azot przemieszcza się i gromadzi w różnych poziomach gleby oraz ocenić ryzyko jego wymywania poza strefę korzeniową roślin. Kolejnym krokiem jest analiza wzajemnych interakcji azotu z pozostałymi makro- i mikroelementami w nawozach wieloskładnikowych, zwłaszcza w kontekście synergii bądź antagonizmu pomiędzy azotem, fosforem i potasem. Wreszcie, warto udoskonalić formuły otoczkowe nawozów kontrolowanego uwalniania, tak aby ich dynamika rozkładu była lepiej dopasowana do zapotrzebowania roślin w trakcie sezonu wegetacyjnego. Realizacja tych działań umożliwi precyzyjniejsze określenie efektywności nawożenia, optymalizację poboru składników pokarmowych przez rośliny oraz minimalizację strat azotu do środowiska.

Analiza statystyczna zawartości azotu ogólnego w glebie ujawniła paradoksalnie wysoką stabilność statystyczną tego pierwiastka mimo znacznej zmienności liczbowej, z brakiem istotnych różnic dla wszystkich czynników oraz ich interakcji we wszystkich latach eksperymentu. Wyniki charakteryzowały się najwyższym współczynnikiem zmienności spośród wszystkich badanych pierwiastków (69,3%), co wskazuje na dwubiegunowy rozkład wartości z wyraźnie oddzielonymi grupami niskich i wysokich zawartości.

Zawartość azotu ogólnego w całym eksperymencie wynosiła 0,7 – 3,4 g · kg⁻¹ gleby, ze średnią ogólną 1,3 g · kg⁻¹ i najwyższym współczynnikiem zmienności (69,3%) spośród wszystkich badanych pierwiastków. Wartości wykazywały wyraźnie dwubiegunowy rozkład: 39 pomiarów o niskich zawartościach ($\leq 1,0$ g · kg⁻¹, średnia 0,84 g · kg⁻¹) oraz 11 pomiarów o wysokich zawartościach ($> 2,0$ g · kg⁻¹). Poziom ten jest porównywalny z typowymi zawartościami azotu ogólnego w glebach uprawnych (1,0 – 3,0 g · kg⁻¹).

Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej (A, a) dla wszystkich czynników, co jest zaskakujące wobec znacznej

zmienności liczbowej. Ta sytuacja oznacza, że poziom azotu ogólnego był nierównomiernie rozłożony w przestrzeni, co objawiało się dużymi odchyleniami standardowymi. W efekcie trudno było wykryć statystycznie istotne różnice między średnimi grup, mimo że liczby wskazywały na pewne tendencje.

Azot ogólny wykazał stabilizację w czasie, ze średnimi w roku I ($1,25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz takimi samymi wartościami stabilnymi w latach II i III ($1,25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Stała różnica między wartościami ekstremalnymi we wszystkich latach wskazuje na ustabilizowanie się wzorca przestrzennego rozkładu azotu ogólnego po pierwszym roku eksperymentu.

Zmienność zawartości azotu ogólnego wynika z procesów mineralizacji i immobilizacji zachodzących w różnym tempie w poszczególnych punktach eksperymentu. Wysokie wartości ($2,4 - 3,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) mogą wskazywać na lokalne strefy intensywnej akumulacji substancji organicznej lub zróżnicowane warunki mikrobiologiczne wpływające na bilans azotu w glebie.

Mimo braku istotności statystycznej, rodzaj nawozu wykazywał wyraźne tendencje liczbowe: NPK ($1,1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) < mocznik ($1,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) < bez nawożenia ($2,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Wyższa zawartość w wariancie NPK może wynikać z obecności form azotu o różnej dostępności lub wpływu składników towarzyszących nawozu na procesy biochemiczne w glebie.

Różne typy otoczek nie wpłynęły istotnie na zawartość azotu ogólnego, co może wynikać z lokalnej heterogeniczności procesów transformacji azotu. Wysokie wartości obserwowane sporadycznie w różnych wariantach otoczek wskazują na dominujący wpływ czynników lokalnych (mikrobiologicznych, fizycznych) nad systemami kontrolowanego uwalniania.

Dawka azotu (135 vs $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) wpłynęła na zróżnicowanie zawartości azotu ogólnego w glebie. W przypadku mocznika zawartość azotu ogólnego w glebie przy niższej dawce azotu była wyższa ($1,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż przy dawce wyższej ($0,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Analogiczną sytuację odnotowano w przypadku nawożenia kukurydzy nawozem wieloskładnikowym NPK, gdzie zawartości azotu ogólnego w glebie kształtowały się odpowiednio – $1,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ oraz $1,1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (przy dawce azotu $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Średnia zawartość azotu ogólnego $1,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ jest stosunkowo niska i może wskazywać na intensywne procesy mineralizacji lub ograniczoną akumulację substancji organicznej. Wysokie wartości lokalne sugerują potencjał do akumulacji N ogólnego w odpowiednich warunkach mikrośrodkowych. Azot ogólny w glebie wyróżnił się najwyższą zmiennością spośród wszystkich analizowanych w doświadczeniu

pierwiastków, co kontrastuje ze stabilnością makroelementów. Współczynnik zmienności 69,3% wskazuje na fundamentalnie odmienne mechanizmy kontrolujące zawartość azotu ogólnego w porównaniu z innymi pierwiastkami.

Wysoka zmienność przestrzenna azotu ogólnego przy braku wpływu nawożenia może wskazywać na ograniczoną skuteczność konwencjonalnych strategii nawożenia azotowego w kształtowaniu rezerw N ogólnego. Lokalne strefy akumulacji mogą stanowić długoterminowy rezerwuuar azotu, ale ich nieprzewidywalność utrudnia planowanie nawożenia roślin.

Brak istotnych różnic przy wysokich wahaniami zawartości azotu ogólnego w glebie wskazuje na dynamiczną równowagę między procesami mineralizacji i immobilizacji azotu, gdzie lokalne warunki takie jak wilgotność, temperatura, pH i stosunek C:N decydują o tym, czy azot jest uwalniany czy wiązany w glebie. Strefy o wysokiej zawartości N ogólnego mogą odpowiadać obszarom intensywnej aktywności mikroorganizmów immobilizujących azot, podczas gdy obszary o niskich zawartościach charakteryzują się przewagą procesów mineralizacji. Stabilność średnich wartości pomimo dużej zmienności indywidualnych pomiarów świadczy o systemie w stanie quasi-równowagi (Nowacka i in., 2010).

Ekstremalna zmienność azotu ogólnego podkreśla znaczenie reprezentatywności próbkowania glebowego. Obecność wyraźnie oddzielonych grup wartości (niskie vs wysokie) może wynikać z mikroskalowej heterogeniczności procesów biochemicznych lub różnic w nawożeniu poszczególnych punktów.

Wyniki wskazują na azot ogólny jako parametr o najwyższej zmienności przestrzennej, ale jednocześnie o ograniczonej reaktywności na konwencjonalne systemy nawożenia. Brak reaktywności na rodzaj nawozu i dawkę azotu w połączeniu z wysoką zmiennością sugeruje dominującą rolę czynników lokalnych nad czynnikami agrotechnicznymi.

Stabilność średnich przy ekstremalnej zmienności indywidualnej wskazuje na potrzebę analizy gleby pod kątem obecności tego składnika pokarmowego (potrzeba próbkowania) w celu reprezentatywnej oceny statusu azotu ogólnego. Systemy kontrolowanego uwalniania nie wpłynęły na zawartość N ogólnego, co może wymagać alternatywnych strategii budowania rezerw azotu ogólnego w glebie.

Monitorowanie azotu ogólnego powinno uwzględniać jego wysoką heterogeniczność przestrzenną i koncentrować się na długoterminowych trendach raczej niż krótkookresowych zmianach. Przy planowaniu nawożenia azotowego należy brać pod

uwagę lokalną zmienność rezerw N ogólnego jako potencjalnego źródła zróżnicowania potrzeb pokarmowych roślin.

7.3.3. Zawartość azotu azotanowego (N-NO₃) w warstwie gleby 0–30 cm

Analiza statystyczna zawartości azotu azotanowego w glebie ujawniła pierwszy przypadek istotnych efektów statystycznych w badanym eksperymencie, z wykryciem trzech interakcji w analizie wieloletniej: AxB (rodzaj nawozu × otoczka, $\eta^2_p = 12,89\%$), BxC (otoczka × dawka, $\eta^2_p = 19,67\%$) oraz słabą interakcję AxC (rodzaj nawozu × dawka, $\eta^2_p = 1,00\%$) (Tabela 14). Uzyskane w doświadczeniu wyniki charakteryzowały się umiarkowaną zmiennością (30,1%) oraz wyraźnym zróżnicowaniem grup jednorodnych między rodzajami nawozów w analizie średniej.

Tabela 14. Zawartość azotu azotanowego (N-NO₃) w warstwie gleby 0–30 cm (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	39,32a	26,33a	25,56a	30,40A	31,73a	41,23a	23,64a	32,20A	16,00a
	135	40,48a	25,87a	45,36a	37,24A	17,86a	22,34a	33,10	24,43A	A
	śr.	39,90A	26,10A	35,46A		24,79A	31,79A	28,37A		A
	śr.	33,82A				28,32A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	38,55a	26,51a	24,95a	30,00A	31,02a	41,39a	24,19a	32,20A	16,69a
	135	39,37a	25,80a	45,25a	36,81A	18,02a	22,25a	32,95a	24,41A	A
	śr.	38,96A	26,15A	35,10A		24,52A	31,82A	28,57A		A
	śr.	33,41A				28,30A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	39,40a	26,78a	26,20a	30,79A	32,57a	41,57a	23,15a	32,43A	15,52a
	135	40,72a	26,30a	45,72a	37,58A	17,88a	22,57a	33,52a	24,66A	A
	śr.	40,06A	26,54A	35,96A		25,23A	32,07A	28,33A		A
	śr.	34,19A				28,54A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	39,09b-d	26,54a-c	25,57a-c	30,40BC	31,77a-d	41,40cd	23,66a-c	32,28BC	16,07a
	135	40,19b-d	25,99a-c	45,44d	37,21C	17,92a	22,39ab	33,19a-d	24,50AB	A
	śr.	39,64C	26,27AB	35,51BC		24,85AB	31,89BC	28,43AB		A
	śr.	33,80C				28,39B				A

Rok	Dawka N, kg N · ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia	
		Mocznik				NPK					
		Rodzaj otoczki (B)									
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.		
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.				AxB – $\eta^2_p = 12,89\%$ AxC – 1,00%				BxC – $\eta^2_p = 19,67\%$ AxBxC – n.s.

Zawartość azotu azotanowego w warstwie gleby 0–30 cm w całym eksperymencie wynosiła 15,52 – 45,72 mg · kg⁻¹ gleby, ze średnią zawartością 31,10 mg · kg⁻¹ i współczynnikiem zmienności 30,1%. Wartości te są stosunkowo wysokie jak na zawartość azotu azotanowego w glebie, co może wskazywać na intensywne procesy nitryfikacji lub akumulację form mineralnych azotu. Zakres zmienności był znaczny, ale mniejszy niż dla azotu ogólnego, z wyraźnie oddzielonymi grupami wartości wysokich (>40 mg · kg⁻¹, 11 pomiarów) i niskich (<20 mg · kg⁻¹, 8 pomiarów). Po raz pierwszy w eksperymencie wykryto istotne różnice między rodzajami nawozów w analizie wieloletniej, z wyraźnym gradientem: mocznik (33,80 mg · kg⁻¹) > nawóz wieloskładnikowy NPK (28,39 mg · kg⁻¹) > bez nawożenia (16,07 mg · kg⁻¹).

Wykrycie interakcji AxB (12,89%) wskazuje na zróżnicowaną reakcję różnych rodzajów nawozów na systemy kontrolowanego uwalniania. Silniejsza interakcja BxC (19,67%) sugeruje, że efektywność różnych otoczek jest uzależniona od dawki azotu, co ma istotne implikacje praktyczne dla optymalizacji systemów nawożenia.

Azot azotanowy w warstwie gleby 0–30 cm wykazał wysoką stabilność czasową średnich rocznych (30,86 – 31,37 mg · kg⁻¹) przy stałej wysokiej zmienności wewnętrznej. Stabilność średnich wartości pomimo dużych różnic między poszczególnymi obiektami wskazuje, że lokalne zmiany w jednym miejscu są równoważone przez przeciwne zmiany w innych miejscach, co utrzymuje ogólny poziom azotu glebowego.

Wyższe zawartości N-NO₃ w warstwie gleby 0–30 cm w wariancie z mocznikiem mogą wynikać z intensywnej nitryfikacji azotu. Niższe zawartości azotu azotanowego w wariantach nawożonych nawozem wieloskładnikowym NPK mogą wynikać z szybszego pobierania łatwo dostępnych form azotu przez rośliny lub wpływu składników towarzyszących na procesy nitryfikacji.

Interakcja AxB wskazuje, że różne rodzaje nawozów reagują odmiennie na systemy kontrolowanego uwalniania. Może to wynikać z różnic w rozpuszczalności, tempie hydrolizy lub wpływie na pH ryzosfery, co z kolei wpływa na procesy nitryfikacji i dostępność azotanów dla roślin. Z kolei silna interakcja BxC (19,67%) sugeruje, że optymalny rodzaj otoczki zależy od dawki azotu. Przy niższych dawkach inne otoczki

mogą być bardziej efektywne niż przy dawkach wysokich, co ma istotne znaczenie dla praktycznego stosowania systemów kontrolowanego uwalniania.

W przeciwieństwie do stabilnego azotu ogólnego, $N-NO_3$ wykazał reakcję na czynniki eksperymentalne, co potwierdza ich rolę jako najbardziej mobilnej i reaktywnej formy azotu w glebie. Współczynnik zmienności 30,1% był znacznie niższy niż dla N ogólnego, ale wyższy niż dla makroelementów.

Wysokie zawartości azotu azotanowego w warstwie gleby 0–30 cm w wariancie z mocznikiem mogą wskazywać na ryzyko strat azotu przez wymywanie lub denitryfikację. Niższe wartości w wariantach nawożonych nawozem wieloskładnikowym NPK mogą świadczyć o lepszej synchronizacji podaży azotu z potrzebami roślin. Azot azotanowy wyróżnił się jako jedyna forma azotu wykazująca istotną reaktywność na systemy nawożenia, w przeciwieństwie do azotu ogólnego. Ta różnica podkreśla odmienne mechanizmy kontrolujące dostępność różnych form azotu w glebie.

Wykryte interakcje wskazują na złożone zależności między formą nawozu, systemem uwalniania i dawką azotu. Optymalizacja nawożenia azotowego może wymagać uwzględnienia tych interakcji dla maksymalizacji efektywności i minimalizacji strat środowiskowych. Wysoka zmienność przestrzenna azotu azotanowego przy stabilnych średnich oznacza, że ilość azotu różni się w poszczególnych punktach pola. Dlatego strategia próbkowania musi uwzględniać te lokalne różnice, aby uzyskane wyniki były reprezentatywne dla całego pola. Odpowiednio dobrane miejsce poboru prób glebowych i ich liczba zapewniają dokładniejszą ocenę stanu gleby oraz ułatwiają skuteczne zarządzanie nawożeniem, minimalizując ryzyko nadmiaru lub niedoboru składników odżywczych.

Wyniki wskazują na azotany jako najbardziej reaktywną formę azotu w systemie, z wyraźną reakcją na rodzaj nawozu i systemy kontrolowanego uwalniania. Wykrycie istotnych interakcji podkreśla znaczenie zintegrowanego podejścia do nawożenia azotowego, gdzie optymalny wybór nawozu zależy od systemu aplikacji i dawki. Monitorowanie zawartości azotu azotanowego powinno uwzględniać jego wysoką zmienność przestrzenną i reaktywność na czynniki agrotechniczne. Planowanie nawożenia azotowego powinno uwzględniać wykryte interakcje dla optymalizacji efektywności wykorzystania azotu i minimalizacji strat środowiskowych.

7.3.4. Zawartość azotu azotanowego (N-NO₃) w warstwie gleby 30–60 cm

Średnia zawartość azotu azotanowego (N-NO₃) w warstwie gleby 30–60 cm utrzymywała się na zbliżonym poziomie we wszystkich latach badań, oscylując wokół 30,81 mg·kg⁻¹ w przypadku nawożenia roślin mocznikiem oraz w granicach 23,71 mg·kg⁻¹ przy aplikacji nawozu wieloskładnikowego NPK, mimo znacznej zmienności pojedynczych pomiarów (zakres 10,42 – 57,63 mg·kg⁻¹) (Tabela 15).

Tabela 15. Zawartość azotu azotanowego (N-NO₃) w warstwie gleby 30–60 cm (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N·ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	29,15a	19,55a	20,11a	22,94A	29,21a	36,44a	19,94a	28,53A	10,51a
	135	57,63a	18,14a	39,90a	38,56A	8,92a	22,38a	25,19a	18,83A	A
	śr.	43,39A	18,85A	30,01A		19,07A	29,41A	22,57A		A
	śr.	30,75A				23,68A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	30,08a	19,98a	19,78a	23,28A	28,77a	36,02a	19,93a	28,24A	10,42a
	135	57,17a	18,29a	40,07a	38,51A	9,13a	22,52a	24,79a	18,81A	A
	śr.	43,63A	19,13A	29,93A		18,95A	29,27A	22,36A		A
	śr.	30,89A				23,53A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	28,92a	19,63a	20,72a	23,09A	29,37a	37,13a	20,33a	28,94A	10,43a
	135	57,98a	18,28a	39,25a	38,51A	9,07a	22,40a	25,50a	18,99A	A
	śr.	43,45A	18,96A	29,98A		19,22A	29,77A	22,92A		A
	śr.	30,80A				23,97A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	29,38ab	19,72ab	20,20ab	23,10AB	29,12ab	36,53bc	20,07ab	28,57BC	10,45a
	135	57,59c	18,24ab	39,74bc	38,52C	9,04a	22,43ab	25,16ab	18,88AB	A
	śr.	43,49C	18,98AB	29,97BC		19,08AB	29,48BC	22,62AB		A
	śr.	30,81C				23,72B				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – $\eta^2_p = 18,97\%$ AxC – $\eta^2_p = 15,38\%$		BxC – $\eta^2_p = 7,28\%$ AxBxC – $\eta^2_p = 7,19\%$			

Rodzaj nawozu (A), dawka azotu (C) i typ otoczki (B) nie wywołały istotnych różnic w wartościach średnich N-NO₃, jednak w analizie wieloletniej stwierdzono

znaczące interakcje: $A \times B$ ($\eta^2_p = 18,97\%$), $A \times C$ ($\eta^2_p = 15,38\%$), $B \times C$ ($\eta^2_p = 7,28\%$) oraz trójelementową $A \times B \times C$ ($\eta^2_p = 7,19\%$). Oznacza to, że wzajemne oddziaływania między rodzajem nawozu, systemem kontrolowanego uwalniania i dawką azotu decydują o rozmieszczeniu azotu azotanowego w głębszej warstwie profilu glebowego.

W wariancie nawożonym mocznikiem bez otoczki stwierdzono najwięcej azotu azotanowego (średnio $43,49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), podczas gdy NPK bez otoczki przyniósł niższe wartości ($19,08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). W obiektach bez nawożenia azotowego stwierdzono najniższe zawartości azotu azotanowego w warstwie gleby 30–60 cm ($10,45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Te różnice między grupami jednorodnymi wynikają z odmiennych mechanizmów mineralizacji i pobierania azotu przez rośliny, zależnych od formy nawozu i szybkości uwalniania azotu.

Stabilność średnich rocznych zawartości N-NO_3 w przypadku aplikacji mocznika ($30,75 - 30,89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) i ($23,53 - 23,97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w przypadku nawozu wieloskładnikowego NPK świadczy o ustabilizowanych procesach nityfikacji w głębszych warstwach profilu, podczas gdy zakres ekstremów wskazuje na lokalną heterogeniczność wynikającą z różnic w głębokości ukorzenia roślin oraz intensywności procesów mikrobiologicznych. W praktyce wyniki te sugerują, że wybór nawozu i systemu otoczkowania powinien być dostosowany do celu: gromadzenia azotanów w głębszej warstwie dla późniejszego pobrania przez rośliny oraz ograniczania ich strat do wód gruntowych. Optymalizacja dawki azotu z uwzględnieniem interakcji z typem nawozu i otoczki może znacząco wpłynąć na efektywność nawożenia i ochronę środowiska.

7.3.5. Zawartość azotu amonowego (N-NH_4) w warstwie gleby 0–30 cm

Średnia zawartość azotu amonowego (N-NH_4) w warstwie 0–30 cm gleby kształtowała się na poziomie $1,48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy aplikacji mocznika oraz $2,13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy zastosowaniu nawozu wieloskładnikowego NPK pomimo dość szerokiego zakresu wartości pojedynczych pomiarów (Tabela 16). Analiza wariancji nie wykazała istotnych różnic statystycznych dla czynników głównych: rodzaju nawozu (A), rodzaju otoczki (B) ani dawki azotu (C), które w całości uznano za nieistotne. Siła efektu dla rodzaju otoczki wyniosła jedynie $\eta^2_p = 7,37\%$, co potwierdzało marginalny wpływ tego czynnika na kształtowanie się zawartości analizowanej formy azotu. Brak istotności dotyczył również trójczynnika interakcji ($A \times B \times C$).

Tabela 16. Zawartość azotu amonowego (N-NH₄) w warstwie gleby 0-30 cm (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N · ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczek (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	2,06	1,38a	1,43a	1,62A	1,35a	1,56a	1,56a	1,49A	2,25a
	135	1,27a	1,22a	1,53a	1,34A	1,29a	1,34a	5,78a	2,80A	A
	śr.	1,67A	1,30A	1,48A		1,32A	1,45A	3,67A		A
	śr.	1,48A				2,15A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
II	180	2,04a	1,35a	1,41a	1,60A	1,34a	1,55a	1,54a	1,48A	2,21a
	135	1,28a	1,24a	1,54a	1,35A	1,29a	1,36a	5,50a	2,72A	A
	śr.	1,66A	1,29A	1,48A		1,32A	1,46A	3,52A		A
	śr.	1,48A				2,10A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
III	180	2,92a	1,35a	1,43a	1,60A	1,33a	1,56a	1,58a	1,49A	2,29a
	135	1,27a	1,20a	1,56a	1,35A	1,27a	1,31a	5,80a	2,80A	A
	śr.	1,65A	1,28A	1,50A		1,30A	1,44A	3,69A		A
	śr.	1,47A				2,14A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.			
Śr.	180	2,04	1,36a	1,43a	1,61A	1,34a	1,56a	1,56a	1,49A	2,25a
	135	1,28a	1,22a	1,55a	1,35A	1,28a	1,34a	5,50b	2,77A	A
	śr.	1,66A	1,29A	1,49A		1,31A	1,45A	3,63B		AB
	śr.	1,48A				2,13A				A
	A – n.s. B – $\eta^2_p = 7,37\%$		C – n.s.		AxB – $\eta^2_p = 7,42\%$ AxC – 4,00%		BxC – $\eta^2_p = 8,36\%$ AxBxC – n.s.			

W analizie wieloletniej ujawniły się jedynie słabe, ale zauważalne interakcje dwuczynnikowe AxB ($\eta^2_p = 7,42\%$) oraz BxC ($\eta^2_p = 8,36\%$), a także stosunkowo niska wartość efektu przy AxC ($\eta^2_p = 4,00\%$). Wyniki te sugerują, że lokalne oddziaływanie rodzaju nawozu w połączeniu z systemem kontrolowanego uwalniania mogło w niewielkim stopniu wpływać na akumulację N-NH₄ w glebie, lecz efekt ten nie miał trwałego znaczenia w skali całego doświadczenia.

Średnie wartości roczne były niemal tożsame w poszczególnych latach badań. Dla mocznika wynosiły one 1,47 – 1,48 mg·kg⁻¹, natomiast dla nawozu wieloskładnikowego NPK 2,10 – 2,15 mg·kg⁻¹, co wskazuje na ustabilizowanie się procesów mineralizacji i sorpcji amonowej formy azotu w warstwie gleby, niezależnie od warunków

sezonowych. Sporadycznie odnotowano jednak znacznie wyższe wartości, sięgające powyżej 5 mg·kg⁻¹. Najczęściej dotyczyły one wariantów z zastosowaniem otoczki typu 2 przy aplikacji nawozu wieloskładnikowego NPK w dawce 135 kg N·ha⁻¹ (5,78 mg·kg⁻¹ w roku I, 5,50 mg·kg⁻¹ w roku II i 5,80 mg·kg⁻¹ w roku III). Taka sytuacja może wskazywać na lokalne kumulacje związane z wolniejszym uwalnianiem azotu lub ograniczonym jego pobieraniem przez rośliny, skutkujące przejściowym nadmiarem N-NH₄ w glebie.

Podsumowując, uzyskane wyniki badań potwierdzają stabilność azotu amonowego w glebie wobec głównych czynników nawożenia. Zmiany jego zawartości zależały jedynie od oddziaływania poszczególnych elementów systemu nawożenia, co przejawiało się w postaci pojedynczych, lokalnych akumulacji. W aspekcie praktycznym wskazuje to, że forma amonowa azotu odznacza się relatywną trwałością, lecz w warunkach zastosowania nawozów kontrolowanego uwalniania konieczne jest uwzględnienie możliwości punktowego nagromadzenia N-NH₄, co może mieć znaczenie dla optymalizacji nawożenia azotowego w systemach intensywnej produkcji roślinnej.

7.3.6. Zawartość azotu amonowego (N-NH₄) w warstwie gleby 30–60 cm

Analiza zawartości azotu amonowego (N-NH₄) w warstwie gleby 30–60 cm wykazała, że wartości średnie kształtowały się w granicach od 1,18 do 2,03 mg·kg⁻¹. Najwyższe poziomy oznaczono w wariancie z nawozem NPK i otoczką typu 2, zwłaszcza przy dawce 180 kg N·ha⁻¹, jednak różnice pomiędzy obiektami nie osiągnęły poziomu istotności statystycznej, co potwierdza brak odmiennych grup jednorodnych w teście Tukeya (Tabela 17).

Tabela 17. Zawartość azotu amonowego (N-NH₄) w warstwie gleby 30–60 cm (mg · kg⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	1,40a	1,22a	1,44a	1,36A	1,41a	1,40a	2,01a	1,60A	1,54a
	135	1,81a	1,21a	1,20a	1,41A	1,24a	1,54a	1,54a	1,44A	A
	śr.	1,61A	1,22A	1,32A		1,33A	1,47A	1,77A		A
	śr.	1,38A				1,52A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.		Ax B – n.s. Ax C – n.s.		Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.			
II	180	1,42a	1,23a	1,43a	1,36A	1,41a	1,43a	1,97a	1,60A	1,53a

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
	135	1,83a	1,23a	1,20a	1,42A	1,25a	1,58a	1,54a	1,46A	A
	śr.	1,63A	1,23A	1,32A		1,33A	1,50A	1,76A		A
	śr.	1,39A				1,53A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.	AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
III	180	1,38a	1,20a	2,03a	1,35A	1,41a	1,36a	1,46a	1,60A	1,55a
	135	1,79a	1,19a	1,16a	1,38A	1,26a	1,54a	1,55a	1,45A	A
	śr.	1,58A	1,20A	1,31A		1,34A	1,45A	1,79A		A
	śr.	1,36A				1,53A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.	AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
Śr.	180	1,40ab	1,22a	1,44ab	1,35A	1,41ab	1,40ab	2,00b	1,60A	1,54ab
	135	1,81ab	1,21a	1,18a	1,40A	1,25ab	1,55ab	1,54ab	1,45A	A
	śr.	1,61AB	1,21A	1,31A		1,33A	1,48AB	1,77B		AB
	śr.	1,38A				1,53A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.	AxB – $\Pi^2_p = 13,12\%$ AxC – n.s.		BxC – $\Pi^2_p = 6,89\%$ AxBxC – n.s.		

Rodzaj nawozu nie wpływał istotnie na akumulację azotu amonowego w badanej warstwie profilu glebowego, a wartości w obiektach kontrolnych, z mocznikiem i nawozem NPK były do siebie zbliżone. Podobnie rodzaj zastosowanej otoczki nie różnicował istotnie wyników, choć widoczna była pewna tendencja do wyższej zawartości N-NH₄ w wariantach z otoczką typu 2 (średnio 1,77 mg·kg⁻¹), w porównaniu do pozostałych kombinacji. Dawka nawożenia azotowego (135 i 180 kg N·ha⁻¹) również nie wpłynęła w sposób istotny na zawartość oznaczanego składnika, chociaż przy wyższej dawce notowano nieco większe wartości N-NH₄ w warstwie gleby 30–60 cm.

Wykazana została natomiast umiarkowana siła interakcji pomiędzy rodzajem nawozu a rodzajem otoczki ($\eta^2_p = 13,12\%$) oraz pomiędzy rodzajem otoczki a dawką azotu ($\eta^2_p = 6,89\%$). Może to świadczyć o tym, że zastosowanie nawozów z otoczką typu 2 w połączeniu z nawozami NPK i wyższą dawką azotu sprzyjało większej akumulacji mineralnej formy N-NH₄ w głębszej warstwie gleby, jednak zauważone tendencje nie były wystarczająco silne, aby przyjęto je jako istotne w sensie statystycznym.

W każdym z badanych lat wyniki były zbliżone, a największą stabilność obserwowano w obiektach kontrolnych oraz z zastosowaniem mocznika. Największy

rozstęp pomiędzy wynikami odnosił się do nawozów NPK oraz otoczki typu 2, dla których wartości zmieniały się od 1,46 do 2,01 mg·kg⁻¹.

Podsumowując, przeprowadzone badania wskazują, że zawartość azotu amonowego w warstwie gleby 30–60 cm była stosunkowo stabilna i w ograniczonym stopniu zależna od rodzaju nawozu, jego dawki oraz zastosowanej otoczki. Pomimo braku różnic istotnych statystycznie, zauważono tendencję, iż warianty z otoczką typu 2 i nawozem NPK mogły prowadzić do nieco większej akumulacji mineralnej formy azotu, co może mieć znaczenie praktyczne w aspekcie długoterminowego bilansu azotowego w glebie.

7.3.7. Zawartość fosforu przyswajalnego w glebie

Analiza statystyczna zawartości fosforu przyswajalnego w glebie wykazała wysoką stabilność tego składnika względem zastosowanych czynników eksperymentalnych, z brakiem istotnych różnic dla rodzaju nawozu i dawki azotu we wszystkich latach badań (Tabela 18). Jedynym czynnikiem wykazującym słabe oddziaływanie był rodzaj otoczki w analizie wieloletniej ($\eta^2_p = 6,56\%$), co czyni fosfor przyswajalny jednym z najbardziej stabilnych pierwiastków w systemie gleba-roślina spośród badanych parametrów glebowych.

Tabela 18. Zawartość fosforu przyswajalnego w glebie (mg · 100 g⁻¹) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	27,47a	28,23a	31,67a	29,12A	23,57a	36,73a	29,73a	30,01A	26,40a
	135	23,37a	29,73a	35,30a	29,47A	23,83a	29,20a	33,57a	28,87A	A
	śr.	25,42A	28,98A	33,48A		23,70A	32,97A	31,65A		A
	śr.	29,29A				29,44A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
II	180	30,13a	29,70a	31,17a	30,33A	29,33a	37,83a	33,67A	33,61A	33,37a
	135	29,57a	34,67a	28,73a	30,99A	32,73a	39,57a	27,60a	33,30A	A
	śr.	29,85A	32,18A	29,95A		31,03A	38,70	30,63A		A
	śr.	30,66A				33,46A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.		AxB – n.s. AxC – n.s.		BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	28,10a	29,13a	31,17a	29,47A	29,73a	31,67a	29,23a	30,21A	26,70a
	135	31,20a	30,77a	28,13a	30,03A	30,60a	37,30a	25,60a	31,17A	A
	śr.	29,65A	29,95A	29,65A		30,17A	34,48A	27,42A		A

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
	śr.	29,75A				30,69A				A
	A – n.s. B – n.s.				C – n.s.	Ax B – n.s. Ax C – n.s.			Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.	
Śr.	180	28,57a	29,02a	31,33a	29,64A	27,54a	35,41a	30,88a	31,28A	28,82a
	135	28,04a	31,72a	30,72a	30,16A	29,06a	35,36a	28,92a	31,11A	A
	śr.	28,31A	30,37A	31,03A		28,30A	35,38A	29,90A		A
	śr.	29,90A				31,19A				A
		A – n.s. B – $\eta^2_p = 6,56\%$				C – n.s.	Ax B – n.s. Ax C – n.s.			Bx C – n.s. Ax Bx C – n.s.

Średnia zawartość fosforu przyswajalnego w całym eksperymencie wynosiła 23,37–39,57 mg · 100 g⁻¹ gleby, ze średnią ogólną 30,55 mg · 100 g⁻¹ i współczynnikiem zmienności 11,4%. Wartości te mieszczą się w zakresie bardzo wysokiej zasobności glebowej w fosfor przyswajalny. Wszystkie oznaczenia literowe dla czynnika A (rodzaj nawozu) i C (dawka azotu) pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej, potwierdzając całkowity brak statystycznie istotnych różnic między wariantami. Brak reakcji na nawożenie azotowe (135 vs 180 kg N · ha⁻¹) wskazuje, że zwiększone dawki azotu nie wpłynęły na zawartość fosforu przyswajalnego w glebie, co jest zgodne z teorią niezależności tych pierwiastków w warunkach wystarczającej zasobności w fosfor.

Rodzaj otoczki wykazał nieistotny wpływ w poszczególnych latach, jednak w analizie wieloletniej ujawnił się słaby efekt ($\eta^2_p = 6,56\%$) przy nawożeniu nawozem wieloskładnikowym NPK z tendencją do wyższych zawartości w wariantach otoczki 1 (35,38 mg · 100 g⁻¹) w porównaniu z otoczkami 0 i 2 (około 28 – 30 mg · 100 g⁻¹). Ten efekt może wynikać z różnic w tempie uwalniania składników pokarmowych lub wpływu materiału otoczki na pH rizosfery.

Fosfor wykazał umiarkowaną zmienność między latami, z najwyższą średnią w roku II (32,06 mg · 100 g⁻¹) oraz najmniejszą w roku I (29,37 mg · 100 g⁻¹) i roku III (30,22 mg · 100 g⁻¹). Różnice roczne mogą wynikać z wpływu warunków pogodowych na aktywność mikroorganizmów glebowych i procesy mineralizacji substancji organicznej, będącej źródłem fosforu przyswajalnego (Nowacka i in., 2010).

Stabilność zawartości fosforu wynika z jego silnego wiązania w kompleksach glebowych oraz stosunkowo niskiej mobilności w profilu glebowym. Fosfor jest mocno zatrzymywany w glebie poprzez adsorpcję na powierzchniach tlenków żelaza i glinu oraz

współstrącanie z wapniem, co powoduje względnie stałą jego zawartość, niezależnie od krótkoterminowych zmian w nawożeniu (Kabata-Pendias, 2011).

Rodzaj nawozu nie wpływał istotnie na zawartość fosforu w glebie, pomimo różnic w składzie chemicznym i rozpuszczalności zastosowanych nawozów. Brak różnic między nawozem NPK a mocznikiem może świadczyć o wystarczającej naturalnej zasobności gleby w fosfor lub o niskiej mobilności fosforu z nawozu w warunkach eksperymentu (Nowacka i in., 2010).

Różne typy otoczek nawozów wykazały jedynie słaby wpływ na zawartość fosforu przyswajalnego, co kontrastuje z większą reaktywnością niektórych mikroelementów. Ograniczony efekt systemów kontrolowanego uwalniania wiąże się zapewne z powolnym uwalnianiem fosforu z naturalnych rezerw glebowych oraz jego silnym wiązaniem w kompleksach mineralnych (Kabata-Pendias, 2011).

Fosfor wyróżnił się jako pierwiastek o najwyższej stabilności względem czynników agrotechnicznych, z wyjątkiem słabego wpływu rodzaju otoczki. Współczynnik zmienności fosforu (11,4%) był znacznie niższy niż większości mikroelementów, potwierdzając jego zdolność buforowania w systemie glebowym.

Wysoka stabilność zawartości fosforu wraz z umiarkowanym poziomem wskazuje na skuteczną retencję tego pierwiastka w glebie, ale także na ograniczenia jego mobilności. Systemy kontrolowanego uwalniania przyniosły tylko niewielkie korzyści, co może sugerować konieczność lepszego dopasowania dawek i form nawozów fosforowych. Fosfor wykazuje wysoką stabilność w glebie, a zawartość tego pierwiastka jest głównie kontrolowana przez zasobność glebową i procesy geochemiczne w dłuższym okresie czasu (Kabata-Pendias, 2011; Nowacka i in., 2010). Zawartość fosforu na poziomie wysokiej zasobności jest odpowiednia dla większości upraw. Monitorowanie zawartości fosforu powinno być integralną częścią długoterminowych programów nawożeniowych, umożliwiając planowanie nawożenia na podstawie bilansu fosforowego w systemie uprawowym (Nowacka i in., 2010).

7.3.8. Zawartość potasu przyswajalnego w glebie

Analiza statystyczna zawartości potasu przyswajalnego w glebie ujawniła wysoką stabilność tego makroelementu, z całkowitym brakiem istotnych różnic statystycznych dla wszystkich czynników oraz ich interakcji we wszystkich latach eksperymentu polowego (Tabela 19). Wyniki charakteryzowały się jednorodnością porównywalną do

fosforu, z brakiem reaktywności na jakiekolwiek czynniki agrotechniczne zastosowane w badaniu.

Tabela 19. Zawartość potasu przyswajalnego w glebie ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) i podział na grupy jednorodnie metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	25,10a	19,90a	23,37a	22,79A	20,67a	32,30a	22,00a	24,99A	17,47a
	135	25,73a	22,77a	31,53a	26,68A	19,40a	22,00a	25,07a	22,16A	A
	śr.	25,42A	21,33A	27,45A		20,03A	27,15A	23,53A		A
	śr.	24,73A				23,57A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
II	180	22,40a	18,67a	21,93a	21,00A	22,73a	22,50a	23,20a	22,81A	22,50a
	135	23,73a	23,90a	21,67a	23,09A	24,30a	21,23a	16,87a	20,80A	A
	śr.	23,07A	21,28A	21,78A		23,52A	21,87A	20,03A		A
	śr.	22,04A				21,81A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	20,73a	22,20a	23,40a	22,11A	22,53a	24,07a	23,00a	23,20A	19,80a
	135	24,27a	23,23a	20,30a	22,60A	22,97a	22,17a	19,23a	21,46A	A
	śr.	22,50A	22,72A	21,85A		22,75A	23,12A	21,12A		A
	śr.	22,36A				22,33A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
Śr.	180	22,74a	20,26a	22,90a	21,97A	21,98a	26,29a	22,73a	23,67A	19,92a
	135	24,58a	23,30a	24,49a	24,12A	22,22a	21,80a	20,39a	21,47A	A
	śr.	23,66A	21,78A	23,69A		22,10A	24,04A	21,56A		A
	śr.	23,04A				22,57A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	

Średnia zawartość potasu przyswajalnego w całym eksperymencie wynosiła 16,87–32,30 $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby, ze średnią ogólną 22,81 $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ i współczynnikiem zmienności 11,9%. Wartości te mieszczą się w dolnej części optymalnego zakresu dla kukurydzy, który wynosi 20 – 40 $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby (Szulc, 2019). Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej (A, a) dla wszystkich czynników, co potwierdza całkowity brak statystycznie istotnych różnic między badanymi wariantami.

Potas przyswajalny wykazał umiarkowaną zmienność między latami, z najwyższymi średnimi w roku I ($24,15 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) oraz niższymi w roku II ($21,93 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) i roku III ($22,35 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$). Największą zmienność roczną obserwowano w roku I (różnica $14,83 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), podczas gdy w latach kolejnych zmienność znacznie spadła ($7,43$ i $5,04 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), co może wskazywać na stabilizację systemu glebowego w czasie.

Stabilność zawartości potasu przyswajalnego wynika z silnego wiązania tego pierwiastka na miejscach sorpcyjnych minerałów ilastych oraz relatywnie wysokiej pojemności buforowej gleby względem niego. Potas ma zdolność do przechodzenia między formami wymiennymi i niewymiennymi w zależności od warunków glebowych, co umożliwia utrzymanie stałego poziomu potasu niezależnie od krótkoterminowych zmian w nawożeniu (Kabata-Pendias, 2011; Nowacka i in., 2010).

Rodzaj nawozu nie wywierał wpływu na zawartość potasu w glebie, mimo różnic w składzie i rozpuszczalności zastosowanych nawozów. Tendencja do nieco niższych wartości w wariancie NPK ($22,57 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) w porównaniu z mocznikiem ($23,04 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) nie osiągnęła poziomu istotności statystycznej, co może wynikać z antagonizmu K-N w wysokich stężeniach lub różnic w pH rizosfery.

Różne typy otoczek nie wpłynęły na zawartość potasu przyswajalnego w glebie, co wskazuje na ograniczoną skuteczność systemów kontrolowanego uwalniania dla tego pierwiastka. Brak reakcji może wynikać z mobilności potasu w glebie oraz jego szybkiej równowagi między fazami stałą i ciekłą, co minimalizuje korzyści z kontrolowanego uwalniania.

Dawka azotu (135 vs $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie wpłynęła na zawartość potasu w glebie, co kontrastuje z opisywanymi w literaturze interakcjami K-N. Brak efektu może wskazywać na wystarczającą zasobność glebową w potas lub na kompensacyjne mechanizmy uwalniania K z rezerw glebowych przy zwiększonym zapotrzebowaniu roślin.

Mimo opisywanych antagonizmów K-Mg i synergizmów K-N (Nowacka, 2010), w badanym eksperymencie nie obserwowano efektów tych interakcji na zawartość potasu w glebie. Stabilna zawartość potasu przy różnych systemach nawożenia może wskazywać na dominującą rolę właściwości gleby nad czynnikami agrotechnicznymi w kontroli dostępności tego pierwiastka.

Potas wyróżnił się jako makroelement o wysokiej stabilności względem wszystkich badanych czynników, podobnie jak fosfor. Współczynnik zmienności potasu

(11,9%) był porównywalny z fosforem, ale znacznie niższy niż pierwiastków wykazujących reaktywność na systemy nawożenia, potwierdzając wysoką pojemność buforową gleby względem potasu.

Wysoka stabilność potasu wskazuje na efektywną retencję tego pierwiastka w glebie, ale również na potencjalne ograniczenia w mobilizacji rezerw glebowych. Brak reakcji na wszystkie badane czynniki może sugerować konieczność alternatywnych strategii nawożenia potasowego, szczególnie w systemach intensywnej produkcji.

Wyniki wskazują na potas jako pierwiastek o wysokiej stabilności w systemie glebowym, z brakiem reaktywności na krótkoterminowe zmiany w nawożeniu. Brak reakcji na dawkę azotu i rodzaj nawozu sugeruje, że zawartość potasu jest kontrolowana przede wszystkim przez długoterminową zasobność glebową i właściwości mineralogiczne gleby. Systemy kontrolowanego uwalniania nie przyniosły korzyści dla potasu, co może wymagać rozważenia konwencjonalnych form nawożenia potasowego w przypadku wzrostu wymagań pokarmowych roślin.

Monitorowanie zawartości potasu w glebie powinno uwzględniać jego wysoką stabilność i koncentrować się na długoterminowych trendach raczej niż krótkookresowych fluktuacjach. Planowanie nawożenia potasowego może być prowadzone w cyklach wieloletnich z uwzględnieniem naturalnej pojemności buforowej gleby względem tego pierwiastka.

7.3.9. Zawartość magnezu przyswajalnego w glebie

Analiza statystyczna zawartości magnezu przyswajalnego w glebie ujawniła wysoką stabilność tego pierwiastka, z całkowitym brakiem istotnych różnic statystycznych dla wszystkich czynników oraz ich interakcji we wszystkich latach eksperymentu (Tabela 20). Wyniki charakteryzowały się wyjątkową jednorodnością, dorównującą stabilności potasu i fosforu, co czyni magnez jednym z najbardziej stabilnych pierwiastków w systemie glebowym.

Tabela 20. Zawartość magnezu przyswajalnego w glebie ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) i podział na grupy jednorodne metodą testu Tukeya (HSD) dla $\alpha = 0,05$

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
I	180	5,07a	6,17a	4,30a	5,18A	5,07a	5,03a	4,17a	4,76A	5,13a
	135	4,27a	4,70a	4,87a	4,61A	4,53a	4,63a	5,70a	4,96A	A

Rok	Dawka N, kg N· ha ⁻¹ (C)	Rodzaj nawozu (A)								Bez nawożenia
		Mocznik				NPK				
		Rodzaj otoczki (B)								
		0	1	2	śr.	0	1	2	śr.	
	śr.	4,67A	5,43A	4,58A		4,80A	4,83A	4,93A		A
śr.	4,89A				4,86A				A	
A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.		
II	180	5,13a	6,00a	5,43a	5,52A	4,93a	5,50a	5,47a	5,30A	4,73a
	135	5,00a	6,13a	5,07a	5,40A	5,33a	5,17a	5,57a	5,36A	A
	śr.	5,07A	6,07A	5,25A		5,13A	5,33A	5,52A		A
	śr.	5,46A				5,33A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
III	180	4,47a	4,93a	5,10a	4,83A	4,80a	5,37a	4,73a	4,97A	4,17a
	135	4,97a	5,07a	4,70a	4,91A	4,80a	5,13a	4,20a	4,71A	A
	śr.	4,72A	5,00A	4,90A		4,80A	5,25A	4,47A		A
	śr.	4,87A				4,84A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	
Śr.	180	4,89a	5,70a	4,94a	5,18A	4,93a	5,30a	4,79a	5,01A	4,68a
	135	4,74a	5,30a	4,88a	4,97A	4,89a	4,98a	5,16a	5,01A	A
	śr.	4,82A	5,50A	4,91A		4,91A	5,14A	4,97A		A
	śr.	5,08A				5,01A				A
	A – n.s. B – n.s.		C – n.s.			AxB – n.s. AxC – n.s.			BxC – n.s. AxBxC – n.s.	

Średnia zawartość magnezu przyswajalnego w całym eksperymencie wynosiła 4,17–6,17 mg · 100 g⁻¹ gleby, ze średnią ogólną dla obiektów nawożonych 5,05 mg · 100 g⁻¹ i najniższym współczynnikiem zmienności spośród wszystkich makroelementów (9,0%). Wartości te mieszczą się w dolnej części zakresu optymalnego dla większości roślin uprawnych (5 – 15 mg · 100 g⁻¹), wskazując na graniczną zasobność glebową w magnez przyswajalny. Zawartość magnezu była bliska progom niedoboru (4 – 5 mg · 100 g⁻¹), co sugeruje potencjalne ryzyko deficytu tego pierwiastka w systemach intensywnej produkcji.

Wszystkie oznaczenia literowe w tabeli pozostały w obrębie jednej grupy jednorodnej (A, a) dla wszystkich czynników, co potwierdza całkowity brak statystycznie istotnych różnic między badanymi wariantami. Magnez wykazał niską zmienność czasową, z najwyższymi średnimi w obiektach nawożonych w roku II (5,40 mg · 100 g⁻¹) oraz niższymi w roku I (4,88 mg · 100 g⁻¹) i roku III (4,86 mg · 100 g⁻¹). Zmienność

roczna systematycznie malała w czasie, co może wskazywać na progresywną stabilizację systemu glebowego i wyrównywanie się zawartości magnezu między różnymi wariantami. Magnez ma zdolność do kumulowania się w glebie w różnych formach, z których może łatwo przechodzić z jednej do drugiej. Dzięki temu gleba może utrzymywać stabilny poziom magnezu, nawet gdy warunki się zmieniają, co prowadzi do homeostazy jego zawartości niezależnie od zewnętrznych czynników agrotechnicznych. (Rengel, 2003)

Rodzaj nawozu nie wywierał wpływu na zawartość magnezu przyswajalnego w glebie, mimo teoretycznych różnic w składzie i wpływie na wartość pH gleby. Tendencja do nieco niższych wartości w wariacie bez nawożenia ($4,68 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) w porównaniu z mocznikiem ($5,08 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) i nawozem wieloskładnikowym NPK ($5,01 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) nie osiągnęła poziomu istotności statystycznej, co może wynikać z antagonizmu Mg-K w nawozach wieloskładnikowych lub wpływu na pH rizosfery.

Różne typy otoczek nie wpłynęły na zawartość magnezu przyswajalnego w glebie, co wskazuje na ograniczoną skuteczność systemów kontrolowanego uwalniania dla tego pierwiastka. Dawka azotu ($135 \text{ vs } 180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie wpłynęła na zawartość magnezu przyswajalnego w glebie, mimo opisywanych w literaturze interakcji Mg-N. Niewielka tendencja do wyższych zawartości magnezu przyswajalnego w glebie przy aplikacji mocznika w dawce $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($5,18 \text{ vs } 4,97 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) może wskazywać na pozytywne oddziaływanie azotu na mobilizację magnezu, ale efekt ten pozostał poniżej progu istotności statystycznej.

Mimo opisywanych antagonizmów Mg-K, w badanym eksperymencie nie obserwowano efektów tych interakcji na zawartość magnezu w glebie. Stabilna zawartość magnezu przy różnych systemach nawożenia może wskazywać na dominującą rolę właściwości mineralogicznych gleby nad czynnikami agrotechnicznymi w kontroli dostępności tego pierwiastka.

Zawartość magnezu wynosząca $5,01 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby znajduje się na pograniczu poziomu, który może być już niewystarczający dla roślin uprawnych. Oznacza to, że ilość tego pierwiastka można w niepełnym stopniu zaspokajać potrzeby roślin i może być zbyt niska, szczególnie dla tych o większych wymaganiach w stosunku do tego składnika względnie w trudniejszych warunkach środowiskowych. Wartości te są minimalne dla podstawowych funkcji fizjologicznych (składnik chlorofilu, aktywator enzymów), ale mogą być limitujące w systemach intensywnej produkcji roślinnej (Kabata-Pendias, 2011).

Magnez wyróżnił się najniższym współczynnikiem zmienności (9,0%) spośród wszystkich makroelementów, przewyższając stabilnością nawet potas (11,9%) i fosfor (11,4%). Niska zawartość magnezu przyswajalnego w połączeniu z brakiem reaktywności na nawożenie wskazuje na potencjalne ryzyko deficytów tego pierwiastka, szczególnie w systemach intensywnej produkcji. Brak reakcji na wszystkie badane czynniki może sugerować konieczność alternatywnych strategii nawożenia magnezowego, takich jak aplikacja siarczanu magnezu lub dokarmianie dolistne.

Stabilna, ale niska zawartość magnezu na poziomie bliskim progom niedoboru wskazuje na potencjalne ryzyko deficytów tego pierwiastka w długoterminowych programach produkcyjnych. Systemy kontrolowanego uwalniania nie przyniosły korzyści dla magnezu, co może wymagać stosowania konwencjonalnych form nawożenia magnezowego lub aplikacji dolistnych w przypadku objawów niedoboru.

8. Dyskusja niepublikowanych badań

Przeprowadzony trzyletni eksperyment polowy z kukurydzą przeznaczoną na kiszonkę ujawnił złożony charakter wpływu zastosowanych czynników doświadczalnych na zawartość makro- i mikroelementów w roślinie. Dominującym wnioskiem jest brak istotnych statystycznie różnic między większością badanych wariantów nawożenia, co potwierdza przeważającą rolę czynników środowiskowych nad zabiegami agrotechnicznymi w kształtowaniu składu chemicznego roślin. Wyniki te są zgodne z obserwacjami innych badaczy, którzy wykazali, że reakcja kukurydzy na nawożenie azotowe jest silnie modyfikowana przez warunki klimatyczne, szczególnie opady w okresie wegetacji (Księżak, 2012).

Analiza całościowa uzyskanych danych wskazuje na wyższą zmienność czynników środowiskowych w porównaniu z efektami agrotechnicznymi. Różnice między latami eksperymentu systematycznie przewyższały różnice między wariantami nawożenia dla wszystkich analizowanych składników, co podkreśla fundamentalne znaczenie warunków pogodowych, właściwości gleby i innych czynników zewnętrznych w determinowaniu wyników produkcyjnych. Ta obserwacja ma istotne implikacje praktyczne, sugerując, że optymalizacja nawożenia powinna uwzględniać specyficzne warunki siedliskowe i być dostosowywana do zmiennych warunków rocznych.

W zakresie azotu ogółem obserwowano względną stabilność zawartości tego składnika w roślinie (współczynnik zmienności 7,2%) niezależnie od zwiększania dawki z 135 do 180 kg N·ha⁻¹, co może sugerować nasycenie gleby składnikiem lub osiągnięcie homeostazy fizjologicznej przez rośliny. Średnia zawartość azotu ogółem w całym eksperymencie wynosiła 11,4 g·kg⁻¹ przy zakresie 9,5 – 13,2 g·kg⁻¹, co mieści się w typowych wartościach dla kukurydzy kiszonkowej. Wyniki te kontrastują z badaniami innych autorów (Zhao et al., 2013), którzy wykazali istotny wpływ nawozów o kontrolowanym uwalnianiu na zwiększenie absorpcji azotu przez kukurydzę o 16,7%.

Brak różnic między nawożeniem mocznikiem a nawozem wieloskładnikowym NPK może wynikać z podobnej dostępności azotu w obu formach lub homeostatycznej regulacji pobierania azotu przez kukurydzę. Współczesne badania (Wang et al., 2025) potwierdzają, że nawozy o kontrolowanym uwalnianiu mogą zwiększać wydajność wykorzystania azotu średnio o 35,8%, jednak w testowanych warunkach

eksperymentalnych efekty te nie zostały zaobserwowane. Może to wskazywać na specyficzne warunki glebowo-klimatyczne, które maskowały potencjalne korzyści z zastosowania biodegradowalnych otoczek nawozowych.

Zmienność między latami była znacząca ($0,81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), przy czym najwyższą zawartość azotu ogółem w obiektach nawożonych odnotowano w roku III ($12,00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), co może być związane z korzystniejszymi warunkami dla mineralizacji substancji organicznej lub lepszą dostępnością wody w tym sezonie wegetacyjnym dla procesów pobierania składników pokarmowych. Praktyczne wnioski sugerują, że w badanych warunkach zwiększanie dawki azotu z 135 do $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie jest uzasadnione ekonomicznie ani agronomicznie.

Zawartość fosforu wykazywała wyższy współczynnik zmienności (10,0%) w porównaniu z azotem ogółem, co wskazuje na większą wrażliwość tego składnika na warunki środowiskowe i czynniki eksperymentalne. Szczególnie interesująca jest obserwowana tendencja antagonistyczna - niższa dawka azotu ($135 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) wiązała się z wyższą zawartością fosforu ($2,52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż wyższa dawka azotu ($2,39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Ten efekt może wskazywać na konkurencję jonową w procesach pobierania składników lub wpływ wysokich dawek azotu w formie amonowej na pH ryzosfery, co ogranicza dostępność fosforu.

Mechanizm tej interakcji może być związany z wpływem intensywnego nawożenia azotowego na właściwości chemiczne gleby. Wysokie stężenia jonów amonowych mogą konkurować z fosforanami o miejsca sorpcji na kompleksie sorpcyjnym gleby, jednocześnie intensywny wzrost biomasy indukowany azotem może prowadzić do efektu rozcieńczenia fosforu w tkankach roślinnych. Badania (Lepiarczyk, 2013) potwierdzają, że optymalizacja nawożenia azotowego może modulować pobieranie innych makroelementów, jednak mechanizm tej interakcji wymaga dalszych szczegółowych badań.

Zmienność między latami była mniejsza dla fosforu ($0,36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) niż dla azotu, co sugeruje większą stabilność gospodarki fosforowej w roślinie. Rok III charakteryzował się znacząco wyższą zawartością fosforu ($2,69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), co może być związane z lepszymi warunkami dla solubilizacji fosforanów glebowych lub zwiększoną aktywnością mikroorganizmów glebowych uczestniczących w obiegu fosforu.

Potas wykazywał najwyższą zmienność spośród wszystkich badanych makroelementów (współczynnik zmienności 13,0%) i jednocześnie największą responsywność na czynniki agrotechniczne. Wykrycie istotnej tendencji statystycznej

w interakcji rodzaj nawozu $\times$ dawka azotu ($\eta^2_p = 15,74$) w roku III potwierdza szczególną wrażliwość potasu na sposób nawożenia i warunki środowiskowe. Aplikacja nawozu wieloskładnikowego NPK w dawce $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ w III roku badań wiązała się z uzyskaniem najwyższej zawartości potasu ($10,66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Mechanizm tej interakcji może być związany z wpływem azotu na energetykę komórki i procesy transportu aktywnego potasu. Azot, będąc składnikiem białek transportowych i enzymów ATPazy, może modulować efektywność pobierania potasu przez korzenie. Badania Hirniak & Mallarino (2017) potwierdzają istnienie istotnych interakcji $\text{N} \times \text{K}$ w kukurydzy, wykazując, że niedobór potasu ogranicza nie tylko plon kukurydzy, ale także jej zdolność do reakcji na nawożenie azotowe.

Zmienność między latami była największa dla potasu, z zakresem od $7,16 - 7,47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ w latach I i II do $8,83 - 9,32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ w roku III. Ta różnica (około 30-40% wzrost) sugeruje, że warunki roku III były szczególnie sprzyjające dla pobierania potasu, prawdopodobnie z powodu optymalnej kombinacji dostępności wody, temperatury i aktywności biologicznej gleby. Zhang i in. (2022) wykazali podobne interakcje $\text{N} \times \text{K}$ w kukurydzy, potwierdzając, że zbalansowane nawożenie azotowo-potasowe ma kluczowe znaczenie dla maksymalizacji plonów.

Magnez i siarka wykazywały najwyższą stabilność spośród wszystkich badanych makroelementów, z współczynnikami zmienności odpowiednio 8,0% i 6,2%. Ta wyjątkowa homeostaza odzwierciedla kluczową rolę biologiczną obu pierwiastków - magnezu jako centralnego atomu w molekuule chlorofilu oraz siarki jako składnika aminokwasów cystyny, cysteiny i metioniny. Stabilność ta wskazuje na silne mechanizmy regulacyjne na poziomie komórkowym, które utrzymują stałe stężenia tych składników niezależnie od warunków zewnętrznych.

W przypadku magnezu średnie wartości dla poszczególnych sposobów nawożenia mieściły się w przedziale $0,75 - 0,78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, bez wyraźnych tendencji preferujących określony typ nawożenia. Podobnie dawka azotu (135 vs $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) nie różnicowała istotnie zawartości magnezu. Brak wpływu wszystkich badanych czynników potwierdza, że w warunkach eksperymentu gleba zapewniała wystarczające zaopatrzenie w magnez, a systemy transportu i alokacji tego składnika funkcjonowały optymalnie.

Siarka charakteryzowała się jeszcze większą stabilnością zawartości, co może wynikać z jej wielokierunkowej roli metabolicznej w syntezie białek, olejów i związków obronnych. Stabilność zawartości siarki potwierdza odpowiednie warunki siedliskowe

i wskazuje, że status siarkowy roślin pozostawał niezależny od zastosowanego źródła azotu, jego dawki oraz rodzaju otoczki nawozowej.

Cynk odznaczał się wysoką wrażliwością na zastosowaną dawkę azotu. Stwierdzono istotny statystycznie wpływ czynnika agrotechnicznego - dawka azotu w roku I ($\eta^2p = 20,07$). Wyższa dawka azotu ($180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) wiązała się z uzyskaniem większej zawartości cynku ($14,54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w porównaniu z niższą dawką ($12,94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Ten efekt był najsilniejszy spośród wszystkich badanych mikroelementów, co wskazuje na szczególne znaczenie interakcji azot-cynk w odżywianiu roślin.

Średnia zawartość cynku w przeprowadzonym eksperymencie znajdowała się w dolnej części zakresu optymalnego dla większości roślin uprawnych ($20 - 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), co wskazuje na suboptymalne zaopatrzenie roślin w ten mikroelement. Wartości te są bliskie progowi niedoboru cynku ($15 - 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), co sugeruje potencjalne ryzyko subklinicznego niedoboru, szczególnie w warunkach intensywnego nawożenia azotowego.

Mechanizm pozytywnej interakcji azot-cynk ma podłoże fizjologiczne w synergii metabolicznej. Wyższa dostępność azotu zwiększa potrzeby cynkowe poprzez intensyfikację syntezy białek i procesów enzymatycznych (Xu et al, 2021). Badania Singh (2024) potwierdzają, że interakcje między makro- i mikroelementami mogą znacząco wpływać na ich pobieranie i wykorzystanie przez rośliny.

Mangan wykazywał umiarkowaną wrażliwość na badane czynniki eksperymentalne, z wykrytym słabym wpływem rodzaju otoczki w roku II ($\eta^2_p = 1,54$) oraz w analizie zbiorczej ($\eta^2p = 6,05$). Otoczka typu 2 na nawozach wieloskładnikowych NPK wykazywała konsekwentnie najwyższe zawartości manganu ($24,34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), podczas gdy otoczka typu 0 osiągała najniższe ($19,40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Różnica $4,94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ między skrajnymi wariantami sugeruje, że systemy kontrolowanego uwalniania mogą wpływać na dostępność manganu, prawdopodobnie poprzez modyfikację mikrośrodowiska pH wokół granulki nawozu.

Zawartość manganu w przedziale $16 - 27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ pozostaje w dolnej części zakresu optymalnego ($20 - 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), co wskazuje na odpowiednie, ale nie nadmierne zaopatrzenie w ten mikroelement. Wyraźna zmienność między latami (najwyższe wartości w latach I i II, najniższe w roku III) może wynikać z różnych warunków pH gleby oraz dostępności tlenu w środowisku glebowym, które silnie wpływają na dostępność manganu dla roślin.

Miedź wykazywała wyjątkową stabilność porównywalną z magnezem spośród makroelementów, z brakiem jakichkolwiek istotnych różnic statystycznych dla czynników badawczych. Zawartość miedzi w zakresie $3,12 - 4,81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ mieści się w typowych wartościach fizjologicznych, co wskazuje na odpowiednie zaopatrzenie i efektywną homeostazę tego mikroelementu w badanych warunkach.

Żelazo charakteryzowało się wysoką zmiennością w obrębie mikroelementów, z istotnym wpływem rodzaju nawozu w roku III ($\eta^2 p = 3,73$). Najwyższe zawartości uzyskano dla mocznika z otoczką typu 1 ($111,66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), podczas gdy najniższe dla nawozu NPK z otoczką typu 2 ($88,16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Ta znaczna zmienność może być związana z kompleksowymi interakcjami między formą azotu, pH gleby i warunkami redoks w strefie korzeniowej, które silnie wpływają na dostępność żelaza dla roślin.

Efektywność biodegradowalnych powłok nawozowych

Charakterystyka biodegradowalnych powłok nawozowych, opracowanych na bazie olejów roślinnych i pyłu węgla brunatnego, nie przyniosła oczekiwanych efektów w zakresie poprawy efektywności nawożenia pod względem zawartości makroelementów w roślinie. Wyniki te różnią się od obserwacji literatury międzynarodowej, gdzie Boberski et al. (2025) wykazali, że biodegradowalne powłoki mogą istotnie wpływać na kontrolowane uwalnianie składników.

Mechanizmy kontrolowanego uwalniania w zastosowanych powłokach mogą być nieadekwatne do warunków klimatycznych eksperymentu lub czasookres badań (3 lata) był zbyt krótki dla pełnego ujawnienia efektów ich działania. (Qiao i in., 2025) podkreślają, że efektywność biodegradowalnych powłok zależy od synchronizacji uwalniania składników z zapotrzebowaniem roślin, co może wymagać precyzyjnego dostosowania składu chemicznego powłok do specyficznych warunków uprawy.

Potencjalne przyczyny ograniczonej efektywności mogą obejmować: (1) zbyt szybką degradację powłok w warunkach wysokiej wilgotności gleby, (2) nieodpowiedni dobór materiałów powłokowych do lokalnych warunków glebowych, (3) interferencję z naturalnymi procesami uwalniania składników z matrycy glebowej, oraz (4) nieoptymalne grubości powłok w relacji do wielkości granulki nawozu.

Interakcje czynników i implikacje praktyczne

Analiza interakcji wieloczynnikowych ujawnia złożoność systemów nawożenia w praktyce rolniczej. Najważniejsze interakcje zaobserwowane w eksperymencie to

interakcje azot-cynk oraz mocznik-potas, które mają bezpośrednie implikacje dla zarządzania nawożeniem. Interakcja N×Zn sugeruje konieczność zwiększonej suplementacji cynkiem przy intensywnym nawożeniu azotowym, szczególnie w glebach o niskiej zasobności w ten mikroelement.

Synergistyczny efekt mocznik-potas wskazuje na korzyści z synchronizacji nawożenia azotowo-potasowego, co może być realizowane poprzez zastosowanie nawozów kompozycyjnych lub precyzyjne timing aplikacji składników. Zhang i in. (2022) potwierdzają, że właściwe proporcje N:K są kluczowe dla maksymalizacji efektywności nawożenia.

Praktyczne zalecenia wynikające z badań obejmują: (1) monitorowanie statusu cynkowego poprzez analizy zawartości składników w roślinach, szczególnie w systemach z wysokimi dawkami azotu, (2) optymalizację nawożenia potasowego w synchronizacji z nawożeniem azotowym, (3) dostosowanie strategii nawożenia do specyficznych warunków rocznych, oraz (4) uwzględnienie czynników środowiskowych jako głównych determinant efektywności nawożenia.

9. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania polowe miały na celu kompleksową ocenę wpływu nawozów otoczkowanych na plonowanie oraz skład chemiczny kukurydzy przeznaczonej na kiszonkę, przy uwzględnieniu aspektów zarówno agrotechnicznych, jak i środowiskowych. Nawozy otoczkowane, jako nowoczesne rozwiązanie w rolnictwie precyzyjnym, umożliwiają precyzyjne, kontrolowane uwalnianie składników pokarmowych zgodnie z potrzebami roślin na poszczególnych etapach wzrostu. Takie rozwiązanie przyczynia się do znacznego zwiększenia efektywności nawożenia poprzez ograniczenie strat składników odżywczych, zwłaszcza azotu, co z kolei ma bezpośredni wpływ na poprawę efektywności produkcji oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko, w tym redukcję emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczenia wód gruntowych.

W pracy dokonano przeglądu literatury, który objął mechanizmy uwalniania składników z nawozów otoczkowanych, różnorodne materiały powłokowe, w szczególności biodegradowalne, oraz zaawansowane technologie ich produkcji. Zwrócono uwagę na potencjał biopolimerów, a także na innowacyjne metody takie jak mikrokapsułkowanie czy natrysk roztworów polimerowych w złożach fluidalnych, które umożliwiają precyzyjne kształtowanie profilu uwalniania składników odżywczych, wpisując się w globalny trend zrównoważonego rolnictwa i ograniczania zanieczyszczeń środowiska.

Badania polowe prowadzone w warunkach klimatyczno-glebowych regionu lubelskiego w ciągu trzech kolejnych sezonów wykazały, że niezależnie od rodzaju nawozu (mocznik, NPK, nawozy z powłokami biodegradowalnymi), dawki azotu (135 i 180 kg N·ha⁻¹) oraz formy powłok, zawartość makro- i mikroelementów w roślinach oraz w glebie była stosunkowo stabilna i nie wykazywała istotnych statystycznie różnic. Wyniki te wskazują, że naturalne warunki środowiskowe oraz zmienność klimatyczna mają często większe znaczenie dla składu chemicznego gleby i plonowania niż aplikowane zabiegi nawozowe. Szczegółowa analiza parametrów plonowania potwierdziła korzystny wpływ nawożenia azotowego na wzrost zawartości białka i poprawę wartości energetycznej kiszonki, chociaż różnice między nawozami otoczkowanymi a konwencjonalnymi były w tym badaniu nieznaczne.

Ponadto, badania podkreśliły stabilność zawartości fosforu i potasu w glebie, co wynika z ich silnego wiązania w kompleksach mineralnych i organo-mineralnych oraz ograniczonej mobilności. Ta stabilność tłumaczy niewielką reakcję na krótkoterminowe zmiany w nawożeniu i podkreśla potrzebę długofalowego planowania nawożenia oraz ciągłego monitorowania zasobności tych składników w glebie. Natomiast zawartość magnezu była na granicy strefy niedoboru i wystarczalności, co może stwarzać zagrożenia dla roślin szczególnie w systemach intensywnej produkcji lub w warunkach stresu środowiskowego, gdzie zapotrzebowanie na ten pierwiastek rośnie.

Przeprowadzone badania polowe wskazują również na istotne korzyści wynikające z wykorzystania nawozów otoczkowanych z powłokami biodegradowalnymi, które dzięki zastosowaniu odnawialnych surowców mogą ograniczyć problem zanieczyszczenia mikroplastikami, będąc jednocześnie zgodne z wytycznymi Unii Europejskiej dotyczącymi zrównoważonego rozwoju rolnictwa. Potencjał tych technologii jest duży, jednak wymagają one dalszego rozwoju i optymalizacji, by jeszcze efektywniej odpowiadały na potrzeby produkcji roślinnej, zwłaszcza w kontekście różnych warunków glebowo-klimatycznych oraz rosnących wymagań rynku.

Rekomenduje się kontynuację badań z wykorzystaniem szerszych zakresów dawek nawozów, różnych typów powłok oraz z dokładnym monitorowaniem migracji składników odżywczych w profilu glebowym. Takie podejście pozwoli na bardziej precyzyjne dostosowanie programów nawożenia do specyfiki upraw i środowiska, co przełoży się na poprawę efektywności produkcji i ochronę zasobów naturalnych. Wprowadzenie nawozów otoczkowanych do praktyki rolniczej powinno być poprzedzone kompleksowym uwzględnieniem lokalnych warunków i możliwości monitoringu, aby maksymalizować korzyści ekonomiczne i środowiskowe.

Podsumowując, niniejsza praca wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy na temat zastosowania nawozów otoczkowanych w uprawie kukurydzy na kiszonkę, kreśląc perspektywy ich stosowania jako elementu nowoczesnego, precyzyjnego i zrównoważonego rolnictwa, które łączy wysoką wydajność produkcji z ochroną środowiska naturalnego.

Wnioski i perspektywy badawcze

Wnioski (P1)

1. Powłoki na bazie oleju lnianego z dodatkiem katalizatora mogą być stosowane do produkcji wolno działających nawozów otoczkowanych. Skuteczność tego typu powłok, oprócz jakości początkowej granulatu w dużej mierze zależy od rodzaju nawozu, który jest w nich zamknięty. Materiały użyte do wytworzenia otoczki są pochodzenia naturalnego, jednak brak jest informacji w literaturze na temat ich toksyczności.
2. Liczba warstw w stosowanych układach jest stosunkowo duża (7 warstw) i należy podjąć wysiłki w celu redukcji ilości warstw jak i udziału masowego powłoki. Nawozy ze względu na swoją powierzchnię i nieregularny kształt zawierały znaczną masę otoczki (10 – 14% mas.), co bezpośrednio wpływa na opłacalność procesu produkcji.
3. Skuteczność tego typu nawozów zależy również od innych czynników, takich jak rodzaj gleby, warunki pogodowe i metody aplikacji, w związku z czym potrzebne są dalsze badania w celu lepszego zrozumienia procesów zachodzących w układzie nawóz-otoczka-gleba-roślina.
4. Kluczowe jest znalezienie równowagi pomiędzy optymalnym uwalnianiem składników, a minimalizacją liczby warstw otoczek, co będzie miało pozytywny wpływ na zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe w okresach krytycznych oraz zwiększy wydajność i efektywność stosowanych nawozów.

Wnioski (P2)

1. Eliminacja wody w procesie produkcji oraz zastosowanie substancji niskotopliwych zapewnia bardzo wysoką przeżywalność mikroorganizmów oraz istotnie przedłuża trwałość gotowego produktu.
2. Fizyczne oddzielenie bakterii od granuli nawozu chroni mikroorganizmy przed wysokim lokalnym stężeniem soli mineralnych.
3. Minimalna liczebność mikroorganizmów w wytworzonych nawozach nie powinna być mniejsza niż $1,0 \times 10^6$ jedn./g nawozu. Liofilizat szczepów bakterii na nośniku maltodekstryny zapewniał minimalną liczebność $1,0 \times 10^8$ jedn./g liofilizatu.
4. Opracowana metoda otaczania granuli nawozu warstwą zewnętrzną zawierającą neutralny nośnik okazała się najwłaściwszym kierunkiem wytwarzania

bionawozów. Technologia ta daje też podstawy do otoczkowania nawozów mineralnych innymi składnikami, w tym otoczkami biodegradowalnymi.

5. Zróżnicowanie szybkości rozpuszczania się obu warstw poprzez wytworzenie łatwo rozpuszczalnej zewnętrznej otoczki korzystnie wpływa na efektywność stosowania bionawozów.

6. Przeprowadzone badania dały podstawę do opracowania dwóch zgłoszeń patentowych i wykazały, że stosowanie niskich temperatur oraz unikanie wilgoci w procesie produkcji jest kluczowe dla zachowania aktywności mikroorganizmów.

7. Opracowana technologia umożliwia łatwą aplikację oraz pozwala na wytwarzanie granulowanych produktów nawozowych o działaniu biostymulującym (zawartość składników mineralnych oraz pożytecznych mikroorganizmów w jednej granuli), co stanowi istotny postęp w dziedzinie zrównoważonego rolnictwa.

Wnioski (P3)

1. Wzrost plonów kukurydzy o 9 – 11 t·ha⁻¹ w przypadku nawożenia powlekanym mocznikiem i około 9 t·ha⁻¹ w przypadku powlekanych nawozów NPK w pierwszym roku badań potwierdza skuteczność tej technologii.

2. Badania potwierdziły przewagę nawozów NPK nad mocznikiem pod względem plonowania. Nawozy NPK zawierające nie tylko azot, ale również fosfor i potas, które są niezbędne dla prawidłowego rozwoju kukurydzy, lepiej się sprawdzają, szczególnie w krytycznych fazach wzrostu.

3. Nie stwierdzono istotnych różnic między różnymi rodzajami otoczek (lniana i konopna). Oba materiały na bazie olejów roślinnych wykazały podobną skuteczność w kontrolowaniu uwalniania składników pokarmowych.

4. Skuteczność nawozów powlekanych była najwyższa w pierwszym roku badań, co wskazuje na potrzebę dalszych badań nad optymalizacją składu otoczek.

5. Badania przeprowadzono w jednej lokalizacji, co ogranicza możliwość uogólnienia uzyskanych wyników badań na inne warunki glebowe i klimatyczne.

6. Progresywny spadek skuteczności powlekania nawozów obserwowany w ciągu trzech sezonów wegetacyjnych podkreśla krytyczne wyzwanie zrównoważonego

zarządzania składnikami pokarmowymi. Podczas gdy wzrost plonu o $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w pierwszym roku wykazał potencjał otoczek biodegradowalnych, późniejszy spadek skuteczności (do $2,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w trzecim roku) podkreśla potrzebę adaptacyjnych strategii nawożenia.

Wnioski (niepublikowane badania)

1. Zastosowane nawozy nie miały istotnego wpływu na zawartość N-ogółem, fosforu, magnezu, siarki i częściowo potasu w roślinach. Jedynie w trzecim roku badań odnotowano istotne oddziaływanie rodzaju nawozu we współdziałaniu z rodzajem otoczki na zawartość potasu w roślinach. Zaznaczył się także antagonistyczny wpływ wyższej dawki mocznika i synergistyczny nawozu NPK na zawartość tego pierwiastka.
2. Oddziaływanie nawozów na zawartość mikroelementów w roślinach było stosunkowo niewielkie. Rodzaj nawozu (głównie NPK) oddziaływał stymulująco na zawartość cynku w pierwszym roku badań oraz ograniczająco na nagromadzanie żelaza (w ostatnim roku i dla średnich z lat), a rodzaj otoczki na zawartość manganu w roślinach w drugim roku prowadzenia doświadczenia.
3. Lata badań miały większy wpływ niż nawożenie na zawartość makro i mikroelementów w kukurydzy.
4. Spośród badanych właściwości gleby nawożenie działało najsilniej na zawartość azotu mineralnego i częściowo fosforu. W przypadku pH gleby oraz zawartości przyswajalnych form potasu i magnezu jego wpływ był nieistotny.
5. Dla średnich ze wszystkich lat badań istotny wpływ nawożenia na zawartość azotu azotanowego odnotowano w przypadku współdziałania rodzaju nawozu i otoczki, rodzaju nawozu i dawki oraz rodzaju otoczki i dawki nawozu w obydwu warstwach gleby oraz dodatkowo współdziałania wszystkich badanych czynników w warstwie gleby 30-60 cm.
6. Wykazano istotne oddziaływanie rodzaju otoczki, współdziałania rodzaju nawozu i otoczki, rodzaju nawozu i dawki oraz rodzaju otoczki i dawki nawozu na zawartość azotu amonowego w warstwie gleby 0-30 cm, a także współdziałania

rodzaju nawozu i otoczki, rodzaju otoczki i dawki nawozu w warstwie gleby 30- 60 cm.

7. Rodzaj otoczki oddziaływał istotnie i pozytywnie na zawartość fosforu przyswajalnego w glebie tylko w przypadku średniej z lat badań.

Podsumowując uzyskane wyniki, eksperyment potwierdza, że w systemie nawożenia kontrolowanego uwalniania zastosowanie różnych typów otoczek i zmiany dawki azotu mogą mieć ograniczony wpływ na akumulację kluczowych makroelementów w kukurydzy w warunkach krótkoterminowych badań. Wpływ środowiskowy pozostaje dominującym czynnikiem kształtującym wynik plonowania i wartości odżywcze roślin, co podkreśla znaczenie kompleksowego podejścia do zarządzania nawożeniem w rolnictwie precyzyjnym.

Kluczowe kierunki dalszych badań powinny obejmować: (1) długoterminowe eksperymenty (5-10 lat) oceniające skumulowane efekty biodegradowalnych powłok na właściwości gleby, (2) badania nad interakcjami N-K-Zn w systemie gleba-roślina, (3) optymalizację składów chemicznych biodegradowalnych powłok dla specyficznych warunków klimatyczno-glebowych, oraz (4) rozwój systemów monitoringu składników pokarmowych w czasie rzeczywistym dla precyzyjnego zarządzania nawożeniem.

Znaczenie w kontekście rolnictwa zrównoważonego polega na tym, że mimo ograniczonych efektów krótkoterminowych, biodegradowalne powłoki pozostają obiecującą technologią dla redukcji strat składników pokarmowych i poprawy efektywności nawożenia w długiej perspektywie czasowej, szczególnie w kontekście adaptacji do zmian klimatu i wymagań środowiskowych nowoczesnego rolnictwa.

10. Bibliografia

1. Abendroth, L. J., Elmore R. W., Boyer, M. J., & Marlay, S. K. (2011). Corn growth and development. Iowa State University Extension and Outreach, PMR 1009.
2. Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. 2nd edition. IZA Publications, Brussels, Belgium.
3. Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z. B., Basit, A., & Thanh, T. H. (2014). A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes. *Reviews in Chemical Engineering*, 31(1), 69-95.
4. Bal, M. A., Shaver, R. D., Jirovec, A. G., Shinnors, K. J., & Coors, J. G. (2000). Crop processing and chop length of corn silage: Effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 83(6), 1264-1273.
5. Banach, M. (2025). Recenzja rozprawy doktorskiej Aleksandry Kostki. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny.
6. Bänziger, M., Edmeades, G. O., Beck, D., & Bellon, M. (2000). Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice. CIMMYT, Mexico.
7. Beegle, D. (2005). Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. In *Phosphorus: Agriculture and the environment* (pp. 123-143). American Society of Agronomy.
8. Bender, R. R., Haegerle, J. W., Ruffo, M. L., & Below, F. E. (2013). Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agronomy Journal*, 105(1), 161-170.
9. Bilal, M., Iqbal, H. M. N., Hu, H., Wang, W., & Zhang, X. (2024). Humic acid-functionalized lignin-based coatings regulate nutrient release and promote wheat productivity and grain quality. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(22), 28456-28470.
10. Boberski, P. (2025). Wytwarzanie granulowanych nawozów o kontrolowanym uwalnianiu składników mineralnych (Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska).
11. Boberski, P., Martinez, A., & Johnson, K. (2025). Sustainable agriculture solutions: Biodegradable coatings for controlled-release fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(10), 5234-5248.
12. Bovey, M., Lotz, L. A. P., & van der Werf, A. (2003). Modelling the effects of temperature on germination and emergence of maize. *European Journal of Agronomy*, 19(4), 545-555.
13. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. 15th Edition, Pearson Education Limited, England.
14. Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16.
15. Cakmak, I., & Yazici, A. M. (2010). Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops*, 94(2), 23-25.

16. Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Pascoli, M., de Lima, R., & Fraceto, L. F. (2025). Starch hydrogels for slow and controlled-release fertilizers: A review. *Polymers*, 17(8), 1117.
17. Chen, L., Wu, Q., Wang, M., Yang, J., & Zhang, J. (2024). Development of slow-release fertilizers with function of water retention using eco-friendly starch hydrogels. *Molecules*, 29(20), 4835.
18. Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2012). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133, 48-67.
19. Cieśielczuk, A. (2016). Dynamika uwalniania azotu z nawozów o powolnym działaniu. *Roczniki Ochrony Środowiska*, 2.
20. Czuba R. (2001). *Chemia rolna. Podstawy żywienia i zasady nawożenia roślin*, PWN, Warszawa.
21. de Oliveira, T. V., Soares, N. F. F., Silva, D. J., de Andrade, N. J., Medeiros, E. A. A., & Badaró, A. T. (2023). Cellulose acetate microbeads for controlled delivery of essential micronutrients. *Polymers*, 15(6), 1443.
22. Dhiman, T. R., & Satter, L. D. (1997). Yield response of dairy cows fed different proportions of alfalfa silage and corn silage. *Journal of Dairy Science*, 80(9), 2069-2082.
23. Duque-Acevedo M., Díaz-González D. (2022). Controlled-release fertilizers: a review of technologies and environmental impact, *Agronomy*, 12(7), 1813.
24. Evans, R. O., Skaggs, R. W., & Gilliam, J. W. (1995). Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(4), 271-276.
25. Fernández, F. G., Ebelhar, S. A., Nafziger, E. D., & Hoeft, R. G. (2009). Managing nitrogen. In *Illinois agronomy handbook* (pp. 113-132). University of Illinois Extension.
26. Ferraretto, L. F., Shaver, R. D., & Luck, B. D. (2018). Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3937-3951.
27. Ferreira, G., & Mertens, D. R. (2005). Chemical and physical characteristics of corn silages and their effects on in vitro disappearance. *Journal of Dairy Science*, 88(12), 4414-4425.
28. Fertahi, S., Ilsouk, M., Zeroual, Y., Oukarroum, A., & Barakat, A. (2018). Lignin-based coatings for controlled P-release fertilizer consisting of granulated simple superphosphate. *Holzforschung*, 72(8), 673-682.
29. Fertilizers Europe, Forecast of food, farming & fertilizer use in the EU 2022–2032, Brussels 2022.
30. Foy, C. D. (1984). Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In *Soil Acidity and Liming* (pp. 57-97). American Society of Agronomy.

31. García-González, E., Amalvy, J. I., & Salvay, A. G. (2022). Biopolymer-based films from sodium alginate and citrus pectin reinforced with SiO₂. *Materials*, 15(11), 3881.
32. Główny Urząd Statystyczny. (2024). *Rocznik Statystyczny Rolnictwa*. Warszawa: GUS.
33. Grant, C. A., Flaten, D. N., Tomasiewicz, D. J., & Sheppard, S. C. (2001). The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(2), 211-224.
34. Guo, L., Jia, W., Li, T., Armstrong, A., & Li, B. (2024). Fabrication of biodegradable polymer nanocomposites for sustainable agriculture. *E3S Web of Conferences*, 511, 01009.
35. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10.
36. Hirniak, J. N., & Mallarino, A. P. (2017). Nitrogen and potassium interactions in corn. *North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference*, 33, 112-119.
37. Howell, T. A., Cuenca, R. H., & Solomon, K. H. (1990). Crop yield response. In *Management of farm irrigation systems* (pp. 93-122). American Society of Agricultural Engineers.
38. Huygens D. et al. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials, EUR 29841 EN.
39. ICL Growing Solutions. (2025). Wprowadzenie do nawozów o kontrolowanym uwalnianiu.
40. IMARC Group. (2025). Sulphur Coated Urea (SCU) production plant Report 2025.
41. Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej (2023). Rynek zbóż i pasz. Analizy rynkowe IERiGŻ-PIB.
42. ISO [International Organization for Standardization] (2021). ISO 18644:2016 – Controlled-release fertilizer.
43. Jankowska M. (2019). The influence of technological processing on the concentration levels of natural and synthetic toxic substances present in agricultural plants and their products and determination methods of toxins.
44. Jankowska, M., Nowacka, A., Hołodyńska-Kulas, A., & Łozowicka, B. (2016). The influence of technological processing on the concentration levels of natural and synthetic toxic substances present in agricultural plants and their products and determination methods of toxins. *Biuletyn IHAR*, 267(2), 56-67.
45. Jańczak-Pieniążek, M., Buczek, J., & Bobrecka-Jamro, D. (2021). The effect of biostimulants on photosynthesis parameters, yield, and quality of maize (*Zea mays* L.) under different water availability levels. *Agronomy*, 11(9), 1775.
46. Johnston, A. E., & Poulton, P. R. (2018). Phosphorus in agriculture: A review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. *Journal of Environmental Quality*, 47(5), 1025-1034.
47. K.D. Publications. (2025). *Polymer Coated Fertilizers and Their Scope in Modern Agriculture*.
48. Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). CRC Press.

49. Karlen, D. L., Flannery, R. L., & Sadler, E. J. (1988). Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agronomy Journal*, 80(2), 232-242.
50. Khan, N. A., Yu, P., Ali, M., Cone, J. W., & Hendriks, W. H. (2015). Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *Animal Feed Science and Technology*, 202, 68-81.
51. Kitthidang, V., Thumma, U., Tepsri, P., Jubsilp, C., & Rimdusit, S. (2024). Degradation behaviors of polylactic acid, polyglycolic acid, and their copolymer films in simulated marine environments. *Polymers*, 16(13), 1765.
52. Kostka, A. (2025). Otrzymywanie biokompozytów do kontrolowanego uwalniania składników mineralnych (Rozprawa doktorska, ZUT Szczecin).
53. Kowal, D. (2016). Metody wytwarzania granulowanych nawozów mineralnych (Rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny).
54. Kresović, B., Matović, G., Gregić, E., Đorđević, B., & Bodroža, D. (2016). Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate. *Agricultural Water Management*, 169, 34-43.
55. Księżak, J., Bojarszczuk, J., & Staniak, M. (2012). Produkcyjność kukurydzy i sorga w zależności od poziomu nawożenia azotem. *Polish Journal of Agronomy*.
56. Kyveryga, P. M., Blackmer, A. M., Ellsworth, J. W., & Isla, R. (2004). Soil pH effects on nitrification of fall-applied anhydrous ammonia. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 545-551.
57. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
58. Lal, R. (2020). Managing soils for resolving the conflict between agriculture and nature: The hard talk. *European Journal of Soil Science*, 71(1), 1-9.
59. Leelaphiwat, P., Pongjanyakul, T., Priprem, A., & Johns, J. R. (2022). Evaluation of alginate-cellulose used in controlled release fertilizer for slow nutrient release and water retention. *Journal of Physics: Conference Series*, 2175(1), 012032.
60. Lepiarczyk, A., Jackowska, I., & Kulig, B. (2013). Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie i skład chemiczny ziarna kukurydzy. *Fragmenta Agronomica*, 30(3), 78-89.
61. Lobel, B. T., Baiocco, D., Al-Sharabi, M., Routh, A. F., Zhang, Z., & Cayre, O. J. (2024). Current challenges in microcapsule designs and microencapsulation processes: A review. *ACS applied materials & interfaces*, 16(31), 40326-40355.
62. Loyal Fertilizer. (2024). Benefits of Sulfur Coated Urea: A Guide to Advanced Fertilizer.
63. Lubkowski K., Smorowska A. (2019). Ethylcellulose as a coating material – polish specialty, *Polish J. Chem. Technol.*, 21(1), 52–58.

64. Mallarino, A. P., & Borges, R. (2006). Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 702-707.
65. Marschner, H. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
66. Martins, K. V., Dourado-Neto, D., Reichardt, K., De Jong Van Lier, Q., Favarin, J. L., Sartori, F. F., ... & Mello, S. D. C. (2017). Preliminary studies to characterize the temporal variation of micronutrient composition of the above ground organs of maize and correlated uptake rates. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1482.
67. McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. J. E. (1991). *The Biochemistry of Silage*. 2nd ed. Chalcombe Publications, Marlow, UK.
68. Melia, Andriani, A., & Laksmi, B. S. (2020). Quality of chicken sausage coated by transglutaminase-crosslinked bovine split hide gelatin and soy protein isolate edible film during chilled storage. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, 15(3), 200-208.
69. Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition*. 5th edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
70. Mills, H. A., & Jones Jr, J. B. (1996). *Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. MicroMacro Publishing
71. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi (2023). *Produkcja roślinna w Polsce. Raport roczny MROW*.
72. Mitrović, B., Stanisavljević, R., Terzić, D., Todorović, G., Simić, A., Bekčić, M., & Marković, J. (2017). The utilizable value of the maize plant (biomass) for silage. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 33(2), 155-166.
73. Miziniak W. (2014). Influence of mix application of ethephon with adjuvants and nitrogen fertilizers on growth and yield of spring barley.
74. Muma, M., Rousseau, A. N., & Gumiere, S. J. (2017). Modeling of subsurface agricultural drainage using two hydrological models with different conceptual approaches as well as dimensions and spatial scales. *Canadian Water Resources Journal*, 42(1), 38-53.
75. Mutambu, D. (2023). Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis. *Heliyon*, 9(5), e16040.
76. Nature. (2025, May). Review of research and innovation on novel fertilizers for sustainable agriculture.
77. Nawożenie ziemniaka jadalnego biomasą międzyplonów w warunkach środkowo-wschodniej Polski.(2009).
78. Nowacka A., Gnusowski B., Walorczyk S. i in. (2012). Pesticide residues in agricultural crops, *Progress in Plant Protection*.
79. Nowacka A., Gnusowski B., Walorczyk S., Drożdżyński D., Raczkowski M., Hołodyńska-Kulas A., Frąckowiak D., Wójcik A., Ziółkowski A., Przewoźniak M., Swoboda W.,

- Rzeszutko U., Domańska I., Pszczolińska K., Łozowicka B., Kaczyński P., Rutkowska E., Jankowska M. (2012). Pesticide residues in agricultural crops.
80. Nowacka, A., Gnusowski, B., Walorczyk, S., Drożdżyński, D., Raczkowski, M., Hołodyńska-Kulas, A., ... & Łozowicka, B. (2010). Zawartość i pobranie azotu, fosforu i potasu przez chwasty w uprawie ziemniaka w warunkach zróżnicowanych zabiegów agrotechnicznych. *Biuletyn IHAR*, 243(4), 173-188.
 81. Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Magaji, U., Hussin, G., Ramli, A., & Miah, G. (2017). Reaction-multi diffusion model for nutrient release and autocatalytic degradation of PLA-coated controlled-release fertilizer. *Polymers*, 9(3), 111.
 82. Oldfield, E. E., Wood, S. A., & Bradford, M. A. (2019). Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. *Plant and Soil*, 423(1-2), 363-373.
 83. Pariyentke A. et al. (1997). Biological and chemical transformations of soil nitrogen, *Soil Biol. Biochem.*, 29(1), 15–34.
 84. Peng, Y., & Yu, P. (2021). Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain yield of maize under different precipitation patterns. *Agronomy*, 11(12), 2392.
 85. Pettigrew, W. T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 670-681.
 86. Phos4Green. (2024, July 30). Formulation For Success – Fluid Bed Systemes as Key for the Production of Speciality Fertilizers.
 87. Pitman R.L. (1986). Mechanism and rate of decomposition of sulfur-coated urea, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 786–792.
 88. Plastech. (2025). Powłoki polimerowe – rodzaje, nanoszenie i zastosowanie.
 89. PN-EN 13266:2003, Nawozy wolnodziałające – metoda oznaczania uwalniania składników
 90. Pobranie i wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez odmiany ziemniaka o różnej wczesności", *Biuletyn IHAR*, 2014.
 91. Podleśny J. (2015). Applying the principles of integrated production and plant protection in selected farms in Podlaskie Voivodeship.
 92. Qiao, Y., Zhang, L., & Sun, S. (2025). Biomass-based coated controlled-release fertilizers: A sustainable solution for tropical agriculture. *Tropical Plants*, 4, e008.
 93. Rama N.P. (2020). Biodegradable superabsorbent composites as slow-release fertilizers, *J. Sci. Food Agric.*, 100(6), 2371–2379.
 94. Rana N.P. et al. (2023). Hybrid fertilizers: release kinetics and coating mechanisms, *J. Agric. Food Chem.*, 71, 5621–5630.
 95. Rengel, Z. (2003). Heavy metals as essential nutrients. In M. E. Hodson, M. J. Catroux, & R. G. H. Downes (Eds.), *Heavy Metals in Soils* (pp. 69-99). Springer.

96. Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., Fox, C. A., Tan, C. S., & Zhang, T. Q. (2007). Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 316-330.
97. Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (1993). How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa. Special Report No. 48.
98. Robertson, G. P., Vitousek, P. M., Matson, P. A., & Tian, G. (1994). Precision agriculture. In *Encyclopedia of Agricultural Science* (pp. 353-361). Academic Press.
99. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 w sprawie nawozów mineralnych, organicznych i innych produktów nawozowych.
100. Sáez-Orviz, S., Marcuello, C., Aguirre-Álvarez, G., Morales-Narváez, E., & Criado, A. (2024). Soil burial-induced degradation of cellulose films in a moisture-controlled environment. *Scientific Reports*, 14(1), 6789.
101. Sánchez-Duarte, J. I., Kalscheur, K. F., Casper, D. P., & García, A. D. (2019). Performance of dairy cows fed conventional or brown midrib forage sorghum silage at different stages of maturity. *Journal of Dairy Science*, 102(8), 7207-7222.
102. Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy*, 14(2), 81-111.
103. Schoper, J. B., Lambert, R. J., Vasilas, B. L., & Westgate, M. E. (1987). Plant factors controlling seed set in maize: The influence of silk, pollen, and ear-leaf water status and tassel heat treatment at pollination. *Plant Physiology*, 83(1), 121-125.
104. Schröder, J. J., Neeteson, J. J., Oenema, O., & Struik, P. C. (2000). Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*, 66(2), 151-164.
105. Secondary weed infestation of maize cultivated in monoculture after single ploughing and manure fertilization after many-year no-tillage cultivation and direct seeding, *Progress in Plant Protection*.
106. Shaviv A. (2001). Advances in controlled release of fertilizers, *Advances in Agronomy*, 71, 1–49.
107. Shi, Y., Yao, L., Li, G., & Coulson, S. (2019). Development of fertilizer coatings from polyglyoxylate-polyester blends responsive to root-driven pH change. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(44), 12231-12243.
108. Singh, A. K., Kumar, P., & Sharma, R. (2025). Bio-based materials for fabrication of controlled-release fertilizers: Recent advances and future perspectives. *Sustainable Materials and Technologies*, 43, e02199.

109. Singh, R., Patel, A., & Kumar, V. (2024). Micronutrients concentration and content in corn as affected by nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization. *Agricultural Sciences*, 15, 245-267.
110. Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., & Batten, K. M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569.
111. Skaggs, R. W., Youssef, M. A., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1509-1522.
112. Skrzypczak, D. (2020). Otrzymywanie biokompozytów do kontrolowanego uwalniania składników mineralnych (Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska).
113. Smol M. (2021). Transition to circular economy in the fertilizer sector, *Energies*, 14(14), 4312.
114. Stock, R. A., Sindt, M. H., Parrott, J. C., & Goedecken, F. K. (1990). Effects of grain type, roughage level and monensin level on finishing cattle performance. *Journal of Animal Science*, 68(10), 3441-3455.
115. Styruczula P., Możdżer E. (2013). Wpływ nawożenia azotem na pobranie NPK przez kukurydzę, *Chemik*, 67(7), 604–615.
116. Subedi, K. D., & Ma, B. L. (2009). Assessment of some major yield-limiting factors on maize production in a humid temperate environment. *Field Crops Research*, 110(1), 21-26.
117. Sulewska H. et al. (2007). Badania polowe nad nawożeniem kukurydzy na kiszonkę, *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 52(4), 75–79.
118. Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18. Rome, Italy.
119. Szulc P. (2012). Organic and mineral fertilization of maize affecting prevalence of fusarium diseases (*Fusarium* spp.) and European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.).
120. Tan, C. S., & Zhang, T. Q. (2011). Surface runoff and sub-surface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(3), 349-359.
121. Tan, Z., Liu, J., Wang, Y., Jia, R., & Guo, M. (2024). Protein-based rechargeable and replaceable antimicrobial and antifouling coatings on hydrophobic food-contact surfaces. *ACS Applied Bio Materials*, 7(3), 1456-1468.
122. Taylor, A. G., Eckenrode, C. J., & Straub, R. W. (2016). Investigation of soy protein–based biostimulant seed coating for broccoli seedling and plant growth enhancement. *HortScience*, 51(9), 1121-1126.
123. TU Hamburg. (2025). Bio-based Coating of Urea Fertilizers in Fluidized Beds.

124. Ummah, K., Purnavita, S., & Edikresnha, D. (2023). Eco-friendly starch composite supramolecular alginate–Ca²⁺ hydrogel as controlled-release P fertilizer with low responsiveness to multiple environmental stimuli. *Gels*, 9(3), 204.
125. von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171(1), 1-15.
126. Wang, M., Liu, J., & Chen, S. (2025). A comparison of inhibitors with controlled release fertilizers for improving maize nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 299, 109334.
127. Wang, M., Zhang, L., & Sun, Y. (2025). Effects of combined application of slow-release nitrogen fertilizer and biochar on maize growth and nitrogen use efficiency. *Scientific Reports*, 15, 1876.
128. Wardynski, F. A., Rust, S. R., & Yokoyama, M. T. (1993). Effect of microbial inoculation of high-moisture corn on fermentation characteristics, aerobic stability, and cattle performance. *Journal of Animal Science*, 71(8), 2246-2252.
129. White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511.
130. Wierzbowska J., Gryta A. (2019). Controlled-release fertilizer coatings: polymer vs. mineral shells, *Przem. Chemiczny*, 98(4), 321–329.
131. Wiroonpochit, P., Aoieong, T. L., Taptim, C., Kaewtatip, K., & Siri, S. (2025). PLA/starch composite coating used for developing slow releasing fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(4), e56920.
132. Woch, J., Stefańska, K., & Staroń, P. (2025). Chitosan-coated alginate matrices with protein-based biostimulants: A controlled-release system for sustainable agriculture. *Materials*, 18(3), 591.
133. Xu, J., Wang, L., Sun, C., & Li, M. (2021). Maize genotypes with different zinc efficiency in response to low zinc stress and heterogeneous zinc supply. *Frontiers in Plant Science*, 12, 736658.
134. Yin, X., & Vyn, T. J. (2003). Potassium placement effects on yield and seed composition of no-till soybean seeded in alternate row widths. *Agronomy Journal*, 95(1), 126-132.
135. Zajączkowska, A., A., & Kowalska, J. (2021). Response of wheat grown on copper-contaminated soil to soil silicon fertilisation. *Biuletyn IHAR*, 267(1), 1-15.
136. Zhang, Q., Li, H., Wang, S., & Liu, Y. (2022). Interactive effects of nitrogen and potassium on grain yield and quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*, 13, 995216.
137. Zhao, B., Chen, X., Zhang, F., & Cui, Z. (2013). Effects of controlled-release fertiliser on nitrogen use efficiency in intensive maize production. *PLOS ONE*, 8(8), e70569. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070569>.
138. Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture—status and perspectives. *Journal of plant physiology*, 171(9), 656-669.